

ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

**П.И. ЯЩЕРИЦЫН,
Е.Э. ФЕЛЬДШТЕЙН,
М.А. КОРНИЕВИЧ**

ТЕОРИЯ РЕЗАНИЯ

*Допущено Учебно-методическим объединением вузов России
по университетскому политехническому образованию в качестве
учебника для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по машиностроительным специальностям*

*Утверждено Министерством образования Республики Беларусь
в качестве учебника для студентов машиностроительных
специальностей учреждений, обеспечивающих
получение высшего образования*

2-е издание, исправленное



МИНСК ООО "НОВОЕ ЗНАНИЕ" МОСКВА 2007

УДК 621.9(075.8)
ББК 34.63я73
Я97

Серия основана в 2005 году

Рецензенты:

кафедра инструментальной техники и технологий Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (зав. кафедрой — доктор технических наук, профессор *А.Е. Древалъ*);

кафедра «Технология машиностроения» Врестского государственного технического университета (зав. кафедрой — кандидат технических наук, доцент *А.П. Акулч*);

зав. кафедрой «Металлорежущие станки и инструменты» Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого, кандидат технических наук, доцент *М.И. Михайлов*

Ящерицын, П.И.

Я97 Теория резания : учеб. / П.И. Ящерицын, Е.Э. Фельдштейн, М.А. Корниевич. — 2-е изд., испр. и доп. — Мн. : Новое знание, 2006. — 512 с. : ил. — (Техническое образование).

ISBN 985-475-195-3.

Подробно рассмотрены физические процессы, происходящие в зоне резания: стружкообразование, контактные явления, теплообмен, изнашивание инструментов, обрабатываемость материалов, формирование обработанной поверхности и др. Особое внимание уделено современным процессам обработки — резанию на станках с ЧПУ, сверхскоростному резанию, резанию с подогревом. Качественные иллюстрации значительно облегчают усвоение материала.

Для студентов машиностроительных специальностей технических высших учебных заведений, аспирантов и инженерно-технических работников машиностроительных предприятий.

УДК 621.9(075.8)
ББК 34.63я73

ISBN 985-475-195-3

© Ящерицын П.И., Фельдштейн Е.Э.,
Корниевич М.А., 2005
© Ящерицын П.И., Фельдштейн Е.Э.,
Корниевич М.А., 2006, с изменениями
© Оформление. ООО «Новое знание», 2006

Предисловие

Машиностроение призвано сыграть ведущую роль в ускорении научно-технического прогресса в народном хозяйстве нашей страны. Характерными чертами его развития является автоматизация технологических процессов, широкое внедрение робототехники, высокая производительность труда. Среди различных технологий, применяемых в машиностроении, обработка резанием является одним из основных методов получения точных деталей машин. Поскольку требования к точности машин и приборов повышаются, становится бесспорной перспективность развития процессов механической обработки. Их универсальность и гибкость обеспечивают преимущества перед другими способами изготовления деталей, особенно при производстве изделий небольшими партиями.

При обработке резанием в ряде случаев имеют место определенные трудности в связи с низкой точностью литых, кованных и штампованных заготовок. Это приводит к увеличению припусков, удорожанию процесса изготовления деталей и нерациональному использованию металла. Однако в результате совершенствования технологии производства заготовок некоторые операции механической обработки уже не используются либо их объем существенно сокращается, т.е. число черновых, обдирочных операций уменьшается, а финишных — возрастает. Однако значительного сокращения объема обработки конструкционных материалов резанием ожидать нельзя, так как с каждым годом конструктивные формы деталей усложняются, повышаются их точность и требования к физико-механическим свойствам поверхностного слоя.

В данном учебнике рассматриваются основные виды резания и материалы, используемые для изготовления режущих инструментов, закономерности образования стружки, контактные явления в зоне резания, силы, вибрации и температура резания, особенности изнашивания инструментов, их работоспособность, качество обработанной поверхности и т.д. Однако только этих сведений было бы недостаточно, чтобы на высоком уровне овладеть теорией резания. Это обусловлено, с одной стороны, внедрением в машиностроительную практику новых видов конструкционных материалов (минералокерамика, спеченные и композиционные материалы, высокопрочные стали и сплавы), о специфике обработки которых сведения практически отсутствуют. С другой стороны, современное машиностроение значительно отличается от традиционного с его поточной технологией и автоматическими линиями. Гибкие производственные системы современного машиностроения работают в постоянно изменяющихся условиях, что несомненно накладывает отпечаток на

физические закономерности процессов, происходящих в зоне резания. Прогрессивное металлообрабатывающее оборудование позволяет широко использовать комбинации различных видов энергии, например механической и тепловой, механической и химической и т.д. Сведения об особенностях обработки в таких условиях в большинстве учебных пособий отсутствуют. Поэтому в настоящем издании особое внимание уделено специфике процесса резания именно в указанных условиях.

Применение фундаментальных основ теории резания способствует достижению значительных успехов в решении практических задач технологии машиностроения. Они являются научной базой для разработки автоматизированных и компьютеризированных систем проектирования и управления технологическими процессами. Информация о закономерностях процесса резания является отправной точкой для разработки новых видов промышленного оборудования, например станков для сверхскоростной обработки. Большое внимание в настоящее время уделяется минимизации экспериментальных исследований путем их замены на различные виды компьютерного моделирования. Такие технологии получили специфическое название «компьютерное резание», а информация для их разработки — «know-how on machining». Информация эта обеспечивается с помощью исследования физических закономерностей процесса резания.

Изучение теории резания как базовой дисциплины машиностроения позволит будущему специалисту успешно овладеть вопросами проектирования металлорежущих станков и инструментов и технологии механической обработки деталей машин и приборов.

1

ГЕОМЕТРИЯ РЕЖУЩЕГО ЛЕЗВИЯ. ЭЛЕМЕНТЫ РЕЖИМА РЕЗАНИЯ И СРЕЗАЕМОГО СЛОЯ

Главные и вспомогательные движения при различных видах обработки резанием. Поверхности обработки

В настоящее время в промышленности используются режущие инструменты, отличающиеся друг от друга по кинематике движения, виду оборудования, способу изготовления, материалу режущей части, конструктивному исполнению и т.д. Однако в каждом из них можно выделить режущий клин, определяющий возможности срезания слоя металла (припуска). Форма режущего клина бывает различной и обуславливает геометрические параметры режущей части инструмента. На основании понятий и определений геометрии простейшего инструмента, например токарного резца, имеющего в своем сечении режущий клин, изучают особенности геометрии более сложных инструментов.

При обработке резанием [1] различают главное движение резания и движение подачи (рис. 1.1).

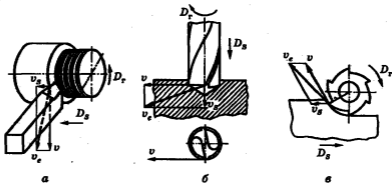


Рис. 1.1. Элементы движений в процессе резания:
а — при обтачивании; б — сверлении; в — цилиндрическом фрезеровании

Главное движение резания D_r — поступательное или вращательное движение заготовки либо режущего инструмента, происходящее в процессе резания с наибольшей скоростью v .

Движение подачи D_s — поступательное или вращательное движение инструмента либо заготовки, скорость которого v , меньше скорости главного движения резания. Движение подачи позволяет отделять слой материала на всей обработанной поверхности. Движения подачи могут различаться по направлениям. Так, при точении перемещение резца параллельно оси заготовки называют **продольной подачей** (рис. 1.2, а), а перпендикулярно к оси — **поперечной** (рис. 1.2, б, в). При этом образуется соответственно деталь цилиндрической формы или плоскость, перпендикулярная к оси центров (рис. 1.2, а, б). Фасонные резцы при поперечной подаче создают различные поверхности вращения (рис. 1.2, в). При перемещении резца под некоторым углом к оси центров образуется коническая поверхность (рис. 1.2, г). Перемещение резца может осуществляться по заданной кривой в соответствии с программой или по копиру в плоскости, проходящей через ось центров; при этом получается поверхность с криволинейной образующей (рис. 1.2, д).

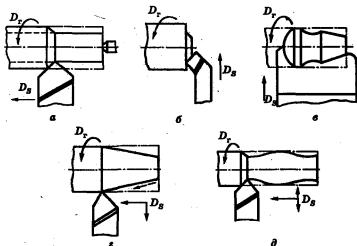


Рис. 1.2. Главное движение и движение подачи при обработке различных поверхностей деталей точением:

- а — цилиндрической; б — торцовой; в — фасонной с врезной подачей; г — конической; д — фасонной с подачей по контуру

Сложение величин v и v_s позволяет определять скорость результирующего движения резания v_e (см. рис. 1.1).

Количество движений, с помощью которых производится процесс резания, различно. Сочетание движений, сообщаемых механизмом станка в процессе резания инструменту и обрабатываемой детали, представляет собой кинематическую схему резания. В зависимости от количества и характера сочетаемых элементарных движений кинематические схемы резания были систематизированы Г.И. Грановским по группам [2]:

- 1) одно прямолинейное движение;
- 2) два прямолинейных движения;
- 3) одно вращательное движение;
- 4) одно вращательное и одно прямолинейное движения;
- 5) два вращательных движения;
- 6) два прямолинейных и одно вращательное движения;
- 7) два вращательных и одно прямолинейное движения;
- 8) три вращательных движения.

Любой реальный процесс резания входит в одну из этих групп. Например, строгание, протягивание — в первую группу; точение, сверление, фрезерование плоских поверхностей — в четвертую; фрезерование тел вращения — в пятую; нарезание зубчатых колес методом обкатки — в седьмую и т.д.

На обрабатываемой заготовке при снятии стружки различают три поверхности: *обрабатываемую*, которая частично или полностью удаляется при обработке; *обработанную*, образованную на заготовке в результате обработки; *поверхность резания*, образуемую режущей кромкой в результирующем движении резания. Поверхность резания является переходной между обрабатываемой и обработанной поверхностями (рис. 1.3).

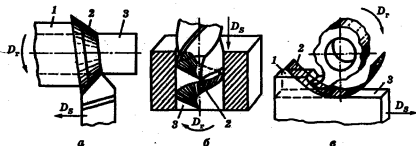


Рис. 1.3. Поверхности обработки при точении (а), сверлении (б), цилиндрическом фрезеровании (в):

1 — обрабатываемая; 2 — резания; 3 — обработанная

Координатные плоскости.

1.2. Поверхности и углы режущего лезвия

Рабочая часть любого режущего инструмента состоит из одного или многих режущих лезвий. На лезвии затачиваются: *передняя поверхность 1*, контактирующая в процессе резания со срезаемым слоем и стружкой; *главная задняя поверхность 3*, контактирующая с поверхностью резания; *вспомогательная задняя поверхность 5*, обращенная к обработанной поверхности (рис. 1.4).

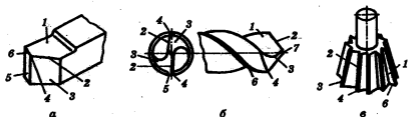


Рис. 1.4. Рабочие поверхности и режущие кромки резца (а), сверла (б), фрезы (в)

При пересечении передней и главной задней поверхностями образуется *главная режущая кромка 2*, а передней и вспомогательной задней — *вспомогательная режущая кромка 6*. Главной режущей кромкой формируется большая сторона сечения срезаемого слоя, а вспомогательной — меньшая. Вспомогательных кромок может быть две. Режущие кромки никогда не бывают абсолютно острыми: образующие их поверхности сопрягаются по радиусу округления ρ .

Место сопряжения главной и вспомогательной режущих кромок называется *вершиной режущего лезвия 4*. Сопряжение бывает остроугольное, по дуге окружности радиусом r_n ($r_n = 0,5 \dots 2$ мм) или по переходной кромке под углом φ_0 ($\varphi_0 = \varphi/2$) (рис. 1.5).

Расположение режущих кромок в пространстве определяет особенности режущего лезвия и оценивается относительно так называемых *координатных плоскостей*. Рассмотрим их на примере токарного резца (рис. 1.6).

Для определения положения режущих кромок резца принимают следующие координатные плоскости: *1* — основная, *2* — резания, *3* — рабочая, *4* — главная секущая, а также вспомогательная

секущая плоскость (на рисунке не показана). Координатные плоскости рассматривают в различных системах координат. *Статическая система* имеет начало в рассматриваемой точке режущей кромки и ориентирована относительно направления скорости главного движения резания, *кинематическая* — относительно направления скорости результирующего движения резания, *инструментальная* — относительно элементов режущего инструмента, принятых за базу.

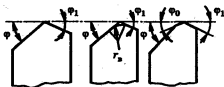


Рис. 1.5. Виды сопряжений главной и вспомогательной режущих кромок

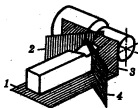


Рис. 1.6. Координатные плоскости резца

Основной плоскостью (в статической системе координат) называется плоскость, проведенная перпендикулярно к направлению скорости главного движения. У токарных резцов эта плоскость совпадает с их нижней опорной поверхностью.

Плоскостью резания называется плоскость, касательная к режущей кромке в рассматриваемой точке и перпендикулярная к основной плоскости. При установке токарного резца по линии центров станка и отсутствии подачи плоскость резания расположена перпендикулярно к нижней опорной поверхности резца.

Рабочая плоскость — это плоскость, в которой расположены векторы скоростей главного движения и движения подачи.

Так как углы резца двугранные, определяются они в секущих плоскостях. **Главной секущей плоскостью 4** (см. рис. 1.6) называ-

ется координатная плоскость, перпендикулярная к линии пересечения основной плоскости I и плоскости резания 2 . В связи с тем что плоскость резания касательна к главной режущей кромке в рассматриваемой точке, главная секущая плоскость всегда нормальна к ее проекции на основную плоскость. **Вспомогательной секущей плоскостью** называется плоскость, перпендикулярная (в рассматриваемой точке) к проекции вспомогательной режущей кромки на основную плоскость.

По расположению режущих кромок относительно координатных плоскостей определяют геометрию режущего лезвия (углы его заточки). Углы, определяемые в главной секущей плоскости, называются **главными** (они определяют режущий клин, отделяющий от припуска слой металла, превращаемый в стружку), во вспомогательной секущей плоскости — **вспомогательными**.

В главной секущей плоскости $N-N$ рассматривают главные задний и передний углы, углы заострения и резания (рис. 1.7).

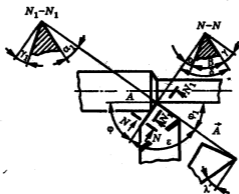


Рис. 1.7. Геометрические параметры лезвия реза

Главным задним углом α называется угол между главной задней поверхностью лезвия (или касательной к ней) и плоскостью резания.

Углом заострения β называется угол между главной задней и передней поверхностями лезвия (или касательными к ним).

Главный передний угол γ — это угол между передней поверхностью лезвия (или касательной к ней) и основной плоскостью в рассматриваемой точке главной режущей кромки. Он имеет положительное значение, если передняя поверхность направлена вниз от режущей кромки, отрицательное значение, если передняя поверх-

ность направлена вверх от нее, и равен нулю, если передняя поверхность параллельна основной плоскости.

Угол резания δ называется угол между плоскостью резания и передней поверхностью лезвия (или касательной к ней).

Между этими углами существуют соотношения $\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$, $\delta + \gamma = 90^\circ$. Во вспомогательной секущей плоскости N_1-N_1 рассматривают вспомогательные задний α_1 и передний γ_1 углы. **Вспомогательный задний угол** — это угол в секущей плоскости, перпендикулярной к основной плоскости, между касательной к вспомогательной задней поверхности в рассматриваемой точке режущей кромки и плоскостью, проведенной через эту точку перпендикулярно основной плоскости.

В основной плоскости измеряются углы в плане. **Главным углом в плане ϕ** называется угол между плоскостью резания и рабочей плоскостью. Для резца он определяется проекцией главной режущей кромки на основную плоскость и направлением подачи. **Вспомогательным углом в плане ϕ_1** называется угол между проекцией вспомогательной режущей кромки на основную плоскость и направлением подачи. **Углом в плане при вершине ε** называется угол между проекциями главной и вспомогательной режущих кромок на основную плоскость. Между этими углами существует соотношение $\phi + \phi_1 + \varepsilon = 180^\circ$.

В плоскости резания измеряется **угол наклона главной режущей кромки λ** (рис. 1.8). Это угол между главной режущей кромкой и основной плоскостью. Если вершина лезвия — низшая точка кромки, то угол λ — положительный, если высшая, — отрицательный. Если режущая кромка параллельна основной плоскости, угол λ равен нулю.

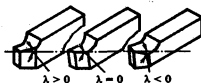


Рис. 1.8. Углы наклона главной режущей кромки резца

Все перечисленные углы режущего лезвия соответствуют данным определениям, если вершина лезвия установлена на уровне оси вращения обрабатываемой детали и геометрическая ось лезвия (например, стержня резца) расположена перпендикулярно к оси вращения обрабатываемой детали. Нарушение этих условий приводит к изменению углов.

Углы токарных резцов и режущих инструментов других видов измеряются в одних и тех же координатных плоскостях. Исключение составляет угол α . Для сверл, зенкеров, разверток и фрез задний угол рассматривают в плоскости, параллельной подаче.

Геометрические параметры реза α , γ , α_1 и γ_1 измеряются в сечениях, перпендикулярных к проекциям режущих кромок на основную плоскость. Однако обеспечить на заточных станках такое положение затачиваемого инструмента относительно шлифовального круга, при котором получают требуемые геометрические параметры в таких сечениях, в большинстве случаев невозможно. Заточные станки позволяют воспроизводить геометрию резания только в продольном и поперечном сечениях реза, перпендикулярных к основной плоскости (рис. 1.9). Углы в этих сечениях связаны между собой следующими соотношениями:

при положительном значении λ

$$\operatorname{tg} \gamma_{\text{пр}} = \operatorname{tg} \gamma \cos \varphi - \operatorname{tg} \lambda \sin \varphi; \quad \operatorname{tg} \gamma_{\text{п}} = \operatorname{tg} \gamma \sin \varphi + \operatorname{tg} \lambda \cos \varphi;$$

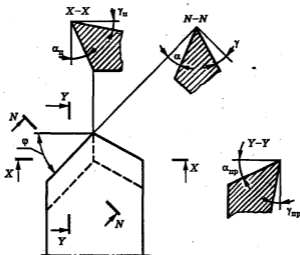


Рис. 1.9. Схема зависимости между передними и задними углами в главной, продольной и поперечной секущих плоскостях

при отрицательном значении λ

$$\operatorname{tg} \gamma_{\text{пр}} = \operatorname{tg} \gamma \cos \varphi + \operatorname{tg} \lambda \sin \varphi; \quad \operatorname{tg} \gamma_{\text{п}} = \operatorname{tg} \gamma \sin \varphi - \operatorname{tg} \lambda \cos \varphi,$$

где $\gamma_{\text{пр}}$ — продольный передний угол; $\gamma_{\text{п}}$ — поперечный.

Так как угол λ небольшой и изменяется в пределах от 0 до $\pm 5^\circ$, второе слагаемое в приведенных формулах очень мало и им можно пренебречь. Тогда

$$\operatorname{tg} \gamma_{\text{пр}} = \operatorname{tg} \gamma \cos \varphi; \quad \operatorname{tg} \gamma_{\text{п}} = \operatorname{tg} \gamma \sin \varphi.$$

Аналогично для продольного и поперечного задних углов:

$$\operatorname{tg} \alpha_{\text{пр}} = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\cos \varphi}; \quad \operatorname{tg} \alpha_{\text{п}} = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sin \varphi}.$$

Данные уравнения для пересчета передних и задних углов в различных секущих плоскостях справедливы для большинства режущих инструментов, но для таких, как, например, фасонные резцы, сверла, зенкера, развертки, метчики и плашки, пересчет продольных углов следует вести по формулам для поперечных углов, и наоборот. Для примера рассмотрим сверло. Допустим, что проекции режущей части одного пера сверла и прямого проходного резца совмещены (рис. 1.10). Таким образом, плоскость $I-I$ является продольной для резца и одновременно поперечной для сверла, плоскость $II-II$, наоборот, — продольной для сверла и поперечной для резца.

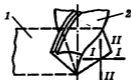


Рис. 1.10. Совмещение проекций режущей части сверла и резца:
1 — прямой проходной резец; 2 — сверло

Рассмотрим геометрические параметры спирального сверла (рис. 1.11). Не повторяя определения основных углов, следует отметить как их соответствие аналогичным углам резца, так и некоторые особенности. Так, наряду с углом φ рассматривают угол при вершине в плане 2φ .

В основной плоскости рассматриваются также вспомогательные углы в плане φ_1 . Чтобы избежать защемления сверла в просверленном отверстии, диаметр рабочей части сверла уменьшают по направлению к хвостовику, т.е. выполняют обратную конусность. Чтобы после переточек диаметр сверла изменялся незначительно, обратная конусность сверла невелика — 0,03...0,15 мм на 100 мм

длины сверла, а угол φ_1 не превышает $10'$. Его можно определить по формуле

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{D - D_1}{2l},$$

где D, D_1 — диаметр сверла соответственно в начале и конце направляющей части; l — длина направляющей части.

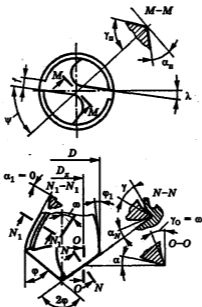


Рис. 1.11. Геометрические параметры спирального сверла

Траектории движения точек главных режущих кромок лежат на воображаемых цилиндрических поверхностях с осями, совпадающими с осью сверла. На этих поверхностях рассматривают главные задние углы сверла. Таким образом, главным задним углом является продольный задний угол (рис. 1.12).

Для уменьшения трения направляющая часть сверла соприкасается с отверстием только по шлифованным винтовым ленточкам, которые расположены по краю винтовой канавки. Остальная часть зуба сверла имеет меньший диаметр и с обработанным отверстием

не соприкасается. Таким образом, кромка ленточки является вспомогательной режущей кромкой. Так как ленточка шлифуется по окружности, вспомогательные задние углы α_1 сверла равны нулю.

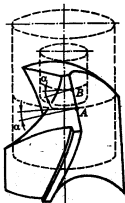


Рис. 1.12. Образование заднего угла на кромке сверла в цилиндрических сечениях

Рабочая часть сверла делится на два лезвия (пера) винтовыми канавками (см. рис. 1.4, б). На поверхности винтовых стружечных канавок образуется и транспортируется стружка, т.е. они являются передними поверхностями сверла. Иначе, передняя поверхность сверла представляет собой винтовую поверхность, состоящую из семейства винтовых линий, у которых одинаковый шаг и различный диаметр.

Углом наклона винтовой канавки ω называется угол между касательной к винтовой линии, образующей эту канавку, и линией, параллельной оси сверла. В разных точках режущей кромки он неодинаков. В периферийной точке главной режущей кромки, т.е. по кромке ленточки, он максимальный. Для других точек режущей кромки угол наклона винтовой канавки тем меньше, чем ближе эта точка к оси сверла. Рассмотрим развертки сечений сверла цилиндрическими поверхностями разного диаметра с осью, совпадающей с осью сверла, на длине шага винтовой канавки. Для сравнения наложим эти сечения одно на другое (рис. 1.13). Как видно из рисунка,

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{\pi D}{H}; \quad \operatorname{tg} \omega_1 = \frac{\pi D_1}{H}; \quad \operatorname{tg} \omega_2 = \frac{\pi D_2}{H},$$

т.е. для любой точки

$$\operatorname{tg} \omega_x = \frac{\pi D_x}{H},$$

где D — диаметр сверла на периферии; D_1, D_2, D_x — диаметр сверла в соответствующих точках режущей кромки, через которые проведены сечения.

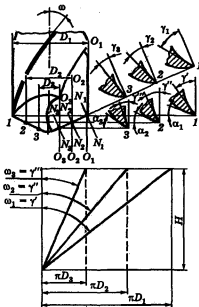


Рис. 1.13. Передние и задние углы сверла в разных точках режущей кромки

Из последней формулы получим:

$$\operatorname{tg} \omega_x = \frac{D_x}{D} \operatorname{tg} \omega.$$

Наклон винтовой стружечной канавки — это наклон передней поверхности сверла в продольном направлении. Следовательно, это продольный передний угол сверла, т.е. $\gamma_{пр} = \omega$. Он измеряется в плоскости, касательной к цилиндру радиусом r_x , ось которого совпадает с осью сверла. Но для характеристики процесса сверле-

ния нужно знать главный передний угол в главной секущей плоскости, который определяет условия резания. Главная секущая плоскость нормальна к проекции главной режущей кромки на основную плоскость.

Так как угол наклона винтовой канавки, являющейся передней поверхностью сверла, уменьшается при приближении от периферии к оси сверла, то и передний угол неодинаков для разных точек режущей кромки. Чем ближе рассматриваемая точка к оси сверла, тем меньше этот угол. На наружном диаметре передний угол $\gamma = 25 \dots 30^\circ$. Соотношение передних углов, измеренных в главной секущей плоскости и в продольном сечении, у сверла такое же, как в поперечном сечении реза (см. рис. 1.10):

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\operatorname{tg} \gamma_{\text{сп}}}{\sin \varphi} = \frac{\operatorname{tg} \omega}{\sin \varphi}$$

Следовательно, для любой точки режущей кромки $\operatorname{tg} \gamma_x = \operatorname{tg} \omega_x / \sin \varphi = D_x \operatorname{tg} \omega / (D \sin \varphi)$.

Угол наклона главной режущей кромки сверла λ — это угол между режущей кромкой и основной плоскостью (см. рис. 1.11).

Пересечение главных задних поверхностей образует *поперечную кромку*, или *перемычку* γ (см. рис. 1.4). *Угол наклона перемычки ψ* — это угол между проекциями поперечной и главной режущей кромок на плоскость, перпендикулярную к оси сверла (см. рис. 1.11). При правильной заточке сверла $\psi = 50 \dots 55^\circ$.

Пересекая перемычку перпендикулярными к ней секущими плоскостями, получим угол резания больше 90° , т.е. передний угол перемычки $\gamma_{\text{пер}}$ — отрицательный. В этом случае перемычка не режет металл, а скоблит его (выдавливает).

Аналогичным образом можно рассмотреть геометрические параметры фрез. Фреза — многолезвийный инструмент, применяемый для обработки плоскостей, пазов, шлицев, тел вращения, резьбы, фасонных поверхностей и разрезки. Участие в работе одновременное нескольких зубьев обеспечивает высокую производительность обработки.

Фреза представляет собой тело вращения, на образующей поверхности или на торце которого имеются режущие зубья. Несмотря на многообразие фрез, схема их работы соответствует цилиндрическому или торцовому фрезерованию (рис. 1.14). При цилиндрическом фрезеровании ось фрезы параллельна обрабатываемой поверхности, работа производится зубьями, расположенными на цилиндрической поверхности фрезы. При торцовом фрезеровании ось фрезы

перпендикулярна к обработанной поверхности. Кроме зубьев, расположенных на цилиндрической поверхности, работают зубья, имеющиеся на торцевой поверхности. Цилиндрическая фреза — это цилиндрическое тело, на поверхности которого в продольном направлении прорезаны канавки для размещения стружки. На пересечении канавок с цилиндрической поверхностью образуются режущие кромки. Для более плавной работы фрезы и увеличения количества одновременно работающих зубьев стружечные канавки делают винтовыми.

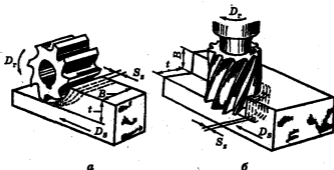


Рис. 1.14. Виды фрезерования:
а — цилиндрическое; б — торцовое

Часть стружечной канавки вблизи режущей кромки является передней поверхностью фрезы, а поверхность, обращенная к поверхности резания — задней (см. рис. 1.4, в). Для удобства заточки и контроля фрезы ее передний угол измеряют в плоскости, перпендикулярной режущей кромке ($N-N$). Для цилиндрической фрезы такой передний угол является *главным передним углом*. В этой же плоскости рассматривают задний угол α_N (рис. 1.15).

Согласно приведенному выше определению *главный задний угол фрезы* α — угол между касательной к ее задней поверхности и плоскостью резания. Однако траекторию движения рассматриваемой точки режущей кромки, определяющую положение плоскости резания, обычно принимают за дугу окружности, поэтому задний угол фрезы удобнее измерять в плоскости, перпендикулярной ее оси ($M-M$). В этой плоскости рассматривается также передний угол фрезы γ_T . Если фреза имеет винтовые зубья, то ее режущие кромки являются винтовыми линиями. Угол их наклона к оси фрезы равен ω .

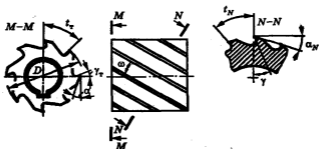


Рис. 1.15. Геометрические параметры режущей части цилиндрической фрезы

У торцовых фрез зубья подобны проходным резцам. В резании кроме главной участвует вспомогательная режущая кромка. Зуб фрезы имеет углы в плане φ , φ_1 , ε (рис. 1.16). Главный передний угол торцовой фрезы γ , как и для всех режущих инструментов, измеряется в главной секущей плоскости. С некоторыми погрешностями ее можно считать перпендикулярной к главной режущей кромке (плоскость $N-N$). Тогда угол γ в рассматриваемой точке — это угол между касательной к передней поверхности в этой точке и основной плоскостью.

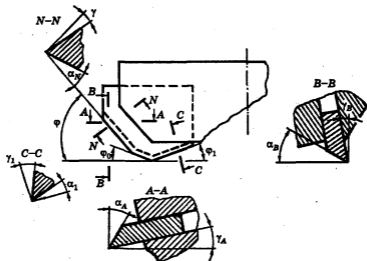


Рис. 1.16. Геометрические параметры режущей части торцовой фрезы

Главный задний угол α фрезы измеряется в плоскости, в которой лежит траектория движения точки режущей кромки, т.е. в плоскости, перпендикулярной к оси фрезы ($A-A$) и совпадающей с направлением подачи.

В главной секущей плоскости $N-N$ определяют нормальный задний угол α_N фрезы: $\operatorname{tg} \alpha_N = \operatorname{tg} \alpha \sin \varphi$. У торцовой фрезы рассматривают также поперечный передний угол γ_A в плоскости $A-A$ и продольные передний γ_B и задний α_B углы фрезы в секущей плоскости $B-B$, параллельной оси фрезы. В сечении $C-C$ измеряется вспомогательный задний угол α_1 .

Соотношения углов заточки и рабочих

1.3. углов режущих инструментов

Резание осуществляется путем перемещения режущего инструмента относительно поверхности обрабатываемой детали. В зависимости от положения плоскости резания в процессе обработки углы инструмента могут изменяться, что наблюдается, когда плоскость резания занимает иное положение, чем в статической системе координат. Кроме того, геометрические параметры режущей части инструментов, полученные после заточки, трансформируются в результате изменения положения реза относительно основной плоскости, при установке вершины реза выше или ниже оси центров станка либо детали, вследствие изнашивания рабочих поверхностей инструмента.

Предположим, что процесс резания осуществляется по схеме, показанной на рис. 1.17, где в качестве инструмента используется призматический брусок со статическими углами $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 0^\circ$. На рис. 1.17, а отсутствует движение подачи, плоскость резания при обработке совпадает со статической, поэтому кинематические углы соответствуют статическим. Инструмент имеет угол $\alpha = 0^\circ$, в результате чего увеличивается трение между задней и обрабатываемой поверхностями. Для уменьшения трения необходимо создать на инструменте положительный задний угол α .

Теперь предположим, что инструменту сообщают одновременно два движения резания (рис. 1.17, б). Одно из движений (главное) совершается со скоростью v , второе (движение подачи) — со скоростью v_s . Результирующей скоростью будет скорость v_e . В данном случае траекторией движения рассматриваемой точки лезвия является наклонная прямая OB , параллельная вектору скорости v_e . Эта прямая — след плоскости резания в процессе обработки. Таким об-

разом, плоскость резания занимает иное положение, чем в статике, так как след плоскости резания в статике — прямая OA . Статический передний угол $\gamma = 0^\circ$, кинематический передний угол γ_k приобретает положительное значение.

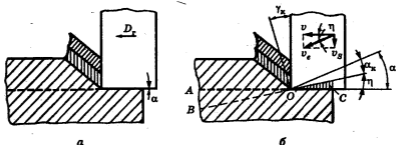


Рис. 1.17. Схема изменения статических углов реза в процессе резания: а — $\alpha = 0^\circ$; б — $\alpha \neq 0^\circ$

Статический задний угол $\alpha = 0^\circ$. В процессе резания он имеет отрицательное значение. В этом случае осуществление процесса резания возможно лишь при условии смятия, пластического деформирования и выдавливания задней поверхностью слоя C материала обрабатываемой детали, препятствующего движению по направлению вектора v_e . Чтобы создать нормальные условия резания, необходимо, чтобы задний угол α был больше, чем угол η : $\operatorname{tg} \eta = v_s / v_e$.

На рис. 1.18 упрощенно показана работа резца при продольном точении с $\varphi = 90^\circ$ и $\lambda = 0^\circ$. Режущая кромка резца установлена на уровне оси заготовки; $B-B$ — положение плоскости резания при вращении заготовки и отсутствии подачи (точки режущей кромки описывают окружности, касательная к ним занимает вертикальное положение); $A-A$ — положение плоскости резания, касательной к винтовой поверхности резания, при работе с включенной подачей; α_k — кинематический задний угол; η — угол между направлениями скоростей результирующего движения резания и главного движения, называемый углом скорости резания.

Поверхность резания в кинематике будет ближе к задней поверхности резца. В результате изменения положения плоскости резания задний угол уменьшается: $\alpha_k = \alpha - \eta$.

Если развернуть окружность вращения и винтовую траекторию точки режущей кромки на плоскости, получим треугольник, в котором катетами будут подача и окружность вращения, а гипотенузой — винтовая траектория; отсюда $\eta = \operatorname{arctg}(S_0 / (2\pi D))$.

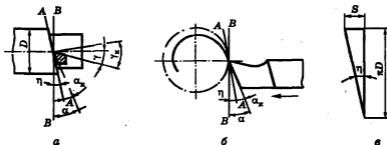


Рис. 1.18. Изменение углов реза в процессе работы:
 а — продольное точение; б — поперечное; в — развертка траектории
 точки режущей кромки реза

С увеличением подачи увеличивается наклон винтовой траектории точки режущей кромки (эти траектории образуют поверхность резания), а кинематический задний угол уменьшается. Разные точки режущей кромки находятся на различных диаметрах заготовки, следовательно, наклон их винтовых траекторий будет различным. Чем меньше диаметр заготовки, тем значительно уменьшается задний угол в процессе работы, так как наклон винтовой траектории больше.

Если резец имеет угол в плане $\varphi = 90^\circ$, то направления подачи и секущей плоскости, в которой измеряется угол α , совпадают. Если угол $\varphi \neq 90^\circ$, то угол между положениями плоскости резания, измеренный в главной секущей плоскости, можно определить по формуле $\operatorname{tg} \eta_\varphi = \operatorname{tg} \eta \sin \varphi$; кинематический задний угол в главной секущей плоскости $\alpha_k = \alpha - \eta_\varphi$.

При поперечном точении, при отрезании детали точки режущей кромки описывают архимедову спираль, следовательно, касательная к поверхности резания и плоскость резания также будут отклоняться от касательной к окружности вращения и кинематический задний угол реза будет меньше.

Чем больше подача и меньше диаметр, на котором расположена точка режущей кромки, тем больше угол между положениями плоскости резания. Следовательно, кинематический задний угол при поперечном точении $\alpha_k = \alpha - \eta_\varphi$, где $\operatorname{tg} \eta_\varphi = \operatorname{tg} \eta \sin \varphi$.

При обычно применяемых при точении подачах угол η незначителен, и изменением заднего угла в процессе работы можно пренебречь. В процессе работы с большими подачами (при затылочных работах, нарезании резьбы, обработке ходовых винтов) необходимо

учитывать изменение заднего угла резца; угол его заточки должен быть больше на угол η_ϕ . Передний угол резца γ в этом случае увеличивается на угол η_ϕ , так как основная плоскость изменяет свое положение (см. определение переднего угла и рис. 1.18). Угол заострения резца β остается постоянным. Таким образом, во время работы резец в главной секущей плоскости будет иметь кинематический передний угол $\gamma_k = \gamma + \eta_\phi$ и кинематический задний угол $\alpha_k = \alpha - \eta_\phi$. Поэтому в процессе работы оптимальный задний угол $\alpha_{\text{опт}} = \alpha + \eta_\phi$. Это уменьшает угол заострения β и ухудшает условия работы резца. Чтобы сохранить их оптимальными, передний угол можно уменьшить на η_ϕ .

Иногда необходимо установить режущую кромку ниже или выше оси заготовки. Наличие положительного либо отрицательно-го угла наклона режущей кромки также приводит к тому, что точки режущей кромки располагаются ниже или выше оси заготовки. При этом будет изменяться положение касательной к поверхности резания (из-за выпуклости или вогнутости поверхности резания). Передний и задний углы установки будут соответственно равны (рис. 1.19):

$$\gamma_y = \gamma \pm \tau_\phi; \quad \alpha_y = \alpha \pm \tau_\phi.$$

Если $\phi = 90^\circ$, то $\tau = \arcsin(h/R)$. Если $\phi \neq 90^\circ$, то $\text{tg} \tau_\phi = \text{tg} \tau \cos \phi$.

Таким образом, во время работы резец в главной секущей плоскости будет иметь кинематические углы:

$$\gamma_k = \gamma + \eta_\phi \pm \tau_\phi; \quad \alpha_k = \alpha - \eta_\phi \pm \tau_\phi.$$

Главный ϕ и вспомогательный ϕ_1 углы в плане могут быть различными в зависимости от установки резца по отношению к оси обрабатываемой детали. Указанное изменение углов ϕ и ϕ_1 показано на рис. 1.20.

При сверлении кинематический задний угол уменьшается, а передний — увеличивается на η (рис. 1.21). Угол η различен для разных точек режущей кромки: $\text{tg} \eta_x = S_o / (2\pi D_x)$; $\alpha_k = \alpha - \eta$.

Чем ближе точка режущей кромки лежит к оси сверла, тем меньше диаметр воображаемой цилиндрической поверхности, по которой проходит траектория точки режущей кромки, и тем значительнее в процессе работы уменьшается задний угол сверла. Уменьшение зазора между задней поверхностью сверла и поверхностью резания (заднего угла) или отсутствие его приводит к повышенному трению и изнашиванию либо делает дальнейшую работу сверла невозможной.

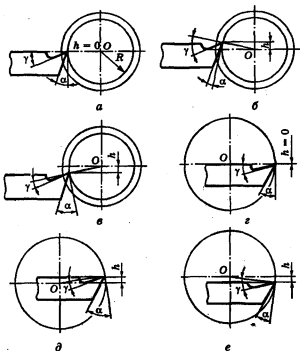


Рис. 1.19. Геометрические параметры реза в зависимости от положения его вершины относительно оси центров: а-в — при наружном точении; г-е — при растачивании

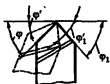


Рис. 1.20. Схема изменения углов φ и φ_1 в плане в зависимости от установки резца относительно оси детали

Даже при малых подачах уменьшение заднего угла в процессе работы для точек, находящихся вблизи оси сверла, весьма существенно. Это уменьшение компенсируют, увеличивая задний угол при заточке: $\alpha_2 = \alpha + \eta$. Если заднюю поверхность сверла заточить по плоскости с одинаковым задним углом во всех точках режущей

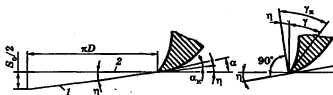


Рис. 1.21. Передний и задний углы сверла в процессе резания:
1 — развернутая винтовая линия; 2 — развернутая окружность

кромки, учитывая максимальное уменьшение его в процессе работы ($\alpha_x = \alpha + \eta_{\max}$), процесс заточки упростится. Но у сверла изменить (уменьшить) передний угол невозможно, а на периферии он достаточно велик. Поэтому при больших задних углах угол заострения β на периферии сверла будет малым, а прочность и теплопровод — низкими. В связи с этим при заточке приходится обеспечивать такое увеличение заднего угла, которое необходимо для каждой точки режущей кромки, т.е. затачивать задний угол переменной величины. Наибольшим задний угол должен быть у оси сверла, наименьшим — на периферии. При этом обеспечивается примерное равенство углов заострения вдоль режущей кромки сверла.

Элементы режима резания и срезаемого слоя при основных видах обработки резанием

1.4. резанием

Элементы режима резания. К элементам режима резания в общем случае относятся скорость главного движения, подача и глубина резания.

Скорость главного движения резания (скорость резания) v — это скорость рассматриваемой точки режущей кромки или заготовки в направлении главного движения резания.

При точении, когда заготовка вращается с частотой вращения n (об/мин), скорость резания (м/мин) в разных точках режущей кромки будет разной. В расчетах принимается ее максимальное значение:

$$v = \frac{\pi D n}{1000},$$

где D — наибольший диаметр поверхности резания, мм.

При продольном точении скорость резания постоянна, а при подрезании торца или отрезании при постоянной частоте вращения — переменная; наибольшее ее значение — у периферии заготовки. В современных токарных станках с ЧПУ предусмотрена возможность обеспечения постоянной скорости резания путем изменения частоты вращения шпинделя.

Аналогичным образом рассчитывается скорость главного движения при сверлении, фрезеровании и других видах обработки с вращательным главным движением.

Подача S — перемещение режущей кромки относительно обработанной поверхности в направлении движения подачи (рис. 1.22). Различают подачу за один оборот заготовки S_0 (мм/об) и за 1 мин $S_{\text{м}} = S_0 \cdot l$ (мм/мин).

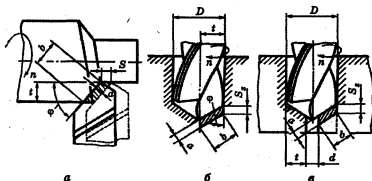


Рис. 1.22. Элементы режима резания и срезаемого слоя:
а — при точении; б — сверлении; в — рассверливании

При токарной обработке подача может быть поперечная и продольная. Сверло имеет два зуба (пера) и режет одновременно двумя режущими кромками, поэтому на каждую кромку (один зуб) приходится подача $S_z = S_0 / z = S_0 / 2$ (мм). Минутная подача $S_{\text{м}} = S_0 \cdot l$. Между подачей на зуб фрезы S_z , на один оборот фрезы S_0 и минутной $S_{\text{м}}$ существует соотношение $S_{\text{м}} = S_0 \cdot l = S_z \cdot l \cdot z$.

Глубина резания t — размер слоя, удаляемого за один проход, измеренный в направлении, перпендикулярном к обработанной поверхности. Глубина резания всегда перпендикулярна к направлению подачи (рис. 1.22).

При продольном точении

$$t = \frac{D - d}{2},$$

где D — диаметр заготовки; d — диаметр обработанной поверхности.

При отрезании заготовки t равна ширине отрезного резца b . Глубина резания при сверлении в сплошном материале равна половине диаметра сверла, а при рассверливании отверстия от диаметра d до диаметра D

$$t = \frac{D - d}{2},$$

где D, d — соответственно конечный и начальный диаметры отверстия.

При фрезеровании глубина резания определяется видом фрезерования и типом фрезы (рис. 1.23): В отличие от других видов обработки (точения, сверления и др.) при фрезеровании кроме глубины резания t рассматривают ширину фрезерования B (это ширина об-

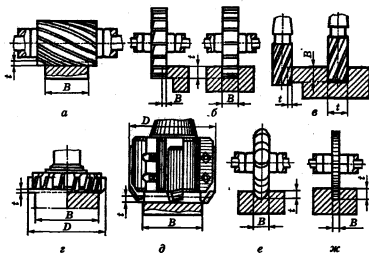


Рис. 1.23. Типы фрез:

a — цилиндрическая; *б* — дисковая и пазовая; *в* — концевые;
г, д — торцовые; *е* — фасонная; *ж* — прорезная

рабатываемой поверхности в направлении, параллельном оси фрезы). У цилиндрических и торцовых фрез ширина фрезерования совпадает с шириной обрабатываемой заготовки, у дисковых фрез — с шириной паза, у концевых — с глубиной паза, уступа (см. рис. 1.14).

Элементы срезаемого слоя. Глубина резания, частота вращения детали или инструмента и подача характеризуют процесс резания с технологической стороны — с точки зрения положения и движения инструмента, обеспечивающих процесс резания. Но при одной и той же подаче и глубине резания в зависимости от формы режущей кромки и ее расположения (углов в плане) изменяются ширина и толщина поперечного сечения срезаемого слоя, от которых зависят процессы пластической и упругой деформации, сопротивление металла деформированию, количество выделившейся теплоты и условия теплоотвода.

Ширина срезаемого слоя, или ширина среза, b (мм) — длина стороны сечения срезаемого слоя, образованной поверхностью резания (см. рис. 1.22).

Толщина срезаемого слоя, или толщина среза, a (мм) — длина нормали к поверхности резания, проведенной через рассматриваемую точку режущей кромки, ограниченная сечением срезаемого слоя.

Толщина и ширина среза представляют собой не толщину и ширину стружки, а размеры сечения среза до ее образования. Размеры стружки отличаются от размеров срезаемого слоя из-за усадки, происходящей вследствие деформации металла при резании. Толщина a среза измеряется в направлении, перпендикулярном к режущей кромке, ширина b среза — вдоль режущей кромки (в миллиметрах). Как между толщиной среза и подачей, так и между глубиной резания и шириной среза существуют определенные соотношения (см. рис. 1.22):

$$a = S \sin \varphi; \quad b = t / \sin \varphi.$$

Из приведенных формул и рис. 1.24 видно, что при постоянных подаче S и глубине резания t с увеличением главного угла в плане φ толщина среза увеличивается, а ширина уменьшается. При фрезеровании для прямозубой фрезы $b = B$, для цилиндрической фрезы с винтовыми зубьями b является переменной величиной. Для торцовых фрез $b = t / (\sin \varphi \cos \lambda)$, где t — глубина фрезерования; φ — угол в плане режущей кромки зуба торцовой фрезы; λ — угол наклона режущей кромки.

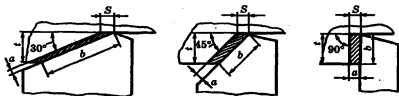


Рис. 1.24. Формы поперечного сечения срезаемого слоя при обработке резцами с различными углами ϕ

Прежде чем приступить к анализу толщины среза при фрезеровании, необходимо определить *угол контакта* δ — центральный угол, соответствующий дуге контакта фрезы с заготовкой.

Из треугольника OBC (рис. 1.25, а) находим:

$$\cos \delta = \frac{OC}{OB} = \frac{D/2 - t}{D/2} = 1 - \frac{2t}{D}; \quad \delta = \arccos \left(1 - \frac{2t}{D} \right).$$

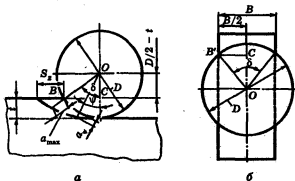


Рис. 1.25. Угол контакта при фрезеровании: а — цилиндрической фрезой; б — торцовой

Полученная формула справедлива только для цилиндрических, дисковых и фасонных фрез. Для торцовых фрез при симметричном фрезеровании (рис. 1.25, б) угол контакта

$$\sin \frac{\delta}{2} = \frac{B/2}{D/2} = \frac{B}{D}.$$

Кроме угла контакта δ различают также *мгновенный угол контакта* ψ — центральный угол между радиусом, проведенным в на-

чальную точку касания зуба фрезы с заготовкой, и радиусом, проведенным в точку мгновенного положения зуба.

Траекторией относительного рабочего движения точки режущей кромки фрезы является удлиненная циклоида, поэтому стружка срезается в виде запятой (рис. 1.26), а толщина ее изменяется от нуля до a_{\max} на выходе зуба из контакта с заготовкой. При используемых отношениях скорости движения детали к скорости вращения фрезы дуга циклоиды мало отличается от дуги окружности. Для упрощения расчета толщины срезаемого слоя при фрезеровании дугу циклоиды можно заменить дугой окружности диаметром, равным диаметру фрезы. Ошибка не будет превышать 1%. На рисунке точка A соответствует моменту выхода из зоны контакта с заготовкой первого зуба, точка B — второго. Приняв длину дуги BC равной длине отрезка BC , получим $AC = a_{\max} = S_z \sin \delta$. Для произвольного угла контакта ψ можно записать: $a_\psi = S_z \sin \psi$.

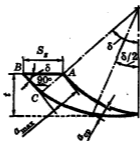


Рис. 1.26. Расчетная схема для определения толщины срезаемого слоя при фрезеровании

При фрезеровании иногда рассматривают понятия средней и срединной толщин среза.

Средняя толщина среза

$$\bar{a} = (a_{\max} + a_{\min})/2 = a_{\max}/2.$$

Срединная толщина среза, соответствующая углу контакта $\delta/2$,

$$a_{\text{ср}} = S_z \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) = S_z \sqrt{\frac{t}{D}}.$$

Площадь поперечного сечения среза. Произведение глубины резания и подачи или ширины среза и его толщины дает номиналь-

ную, или расчетную, площадь среза (мм^2), которая при резании одной режущей кромкой равна $f = tS = ab$.

При резании одновременно двумя и более режущими кромками действительная площадь среза отличается от номинальной на площадь гребешков, остающихся на обработанной поверхности из-за наличия углов в плане и закругления вершины лезвия (рис. 1.27). Отличия эти незначительны, и в практических расчетах ими можно пренебречь.

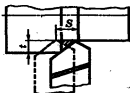


Рис. 1.27. Формирование остаточных гребешков на обработанной поверхности

Площадь поперечного сечения среза, снимаемая одним зубом цилиндрической фрезы с прямыми зубьями, $f = Ba$. Она изменяется, как и толщина среза, от нуля до максимума:

$$f_{\max} = Ba_{\max} = BS_z \sin \delta = 2BS_z \sqrt{\frac{t}{D} - \left(\frac{t^2}{D^2}\right)}.$$

При фрезеровании в работе участвует одновременно несколько зубьев, поэтому вводится понятие суммарной площади поперечного сечения среза. Для ее определения необходимо знать, сколько зубьев одновременно находится в работе и каков мгновенный угол контакта для каждого работающего зуба.

Количество зубьев фрезы, одновременно находящихся в работе, $m = \delta/\eta = \delta z/360^\circ$, где δ — полный угол контакта фрезы с заготовкой; η — центральный угол между двумя соседними зубьями фрезы: $\eta = 360^\circ/z$; z — число зубьев фрезы.

Значение m округляется до ближайшего большего целого числа. Если $1 < m < 2$, то одновременно в работе находится два зуба, если $2 < m < 3$, — три зуба, и т.д. При неизменном диаметре фрезы D количество одновременно работающих зубьев тем больше, чем меньше их шаг t и больше число зубьев фрезы z . При неизменных шаге и числе зубьев фрезы количество одновременно работающих зубьев увеличивается с увеличением ее диаметра.

Мгновенные углы контакта для работающих зубьев 1, 2, 3 фрезы соответственно равны (рис. 1.28, а): $\psi_1 = \delta$, $\psi_2 = \delta - \eta$, $\psi_3 = \delta - 2\eta$, ...

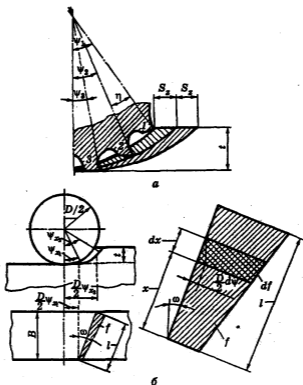


Рис. 1.28. Расчетная схема к определению площади среза цилиндрической фрезой с прямыми (а) и винтовыми (б) зубьями

Так как для каждого зуба площадь поперечного сечения среза $f = BS_z \sin \psi$, суммарная площадь поперечного сечения среза, снимаемого прямозубой фрезой,

$$F = \sum_{i=1}^m f_i = BS_z (\sin \psi_1 + \sin \psi_2 + \dots + \sin \psi_m) = BS_z \sum_{i=1}^m \sin \psi_i.$$

Для фрезы с винтовыми зубьями толщина среза подсчитывается так же, как и для фрезы с прямыми зубьями: $a = S_z \sin \psi_x$. Но эта толщина переменная не только вдоль дуги контакта (в плоскости, перпендикулярной к оси фрезы), но и вдоль длины режущей кромки зуба, так как вследствие винтового расположения кромки мгновенные углы контакта для разных ее точек различны (рис. 1.28, б).

Возьмем на режущей кромке зуба точку на расстоянии x от его конца. Элементарный участок кромки dx срезает слой толщиной a_x и поперечным сечением df :

$$dx = \frac{D}{2} \frac{d\psi}{\sin \omega}; \quad df = a_x \frac{D}{2} \frac{d\psi}{\sin \omega} = S_z \sin \psi_x \frac{D}{2} \frac{d\psi}{\sin \omega}.$$

Поперечное сечение слоя, срезаемого винтовым зубом фрезы,

$$f = \int_{\psi_1}^{\psi_2} df = \frac{D}{2} \frac{S_z}{\sin \omega} \int_{\psi_1}^{\psi_2} \sin \psi_x d\psi = \frac{D}{2} \frac{S_z}{\sin \omega} (\cos \psi_1 - \cos \psi_2).$$

Площадь суммарного сечения слоя, срезаемого одновременно работающими винтовыми зубьями фрезы,

$$F = \sum_{i=1}^m f_i = \frac{D}{2} \frac{S_z}{\sin \omega} \sum_{i=1}^m (\cos \psi_{1i} - \cos \psi_{2i}),$$

где ω — угол наклона винтовой канавки фрезы; ψ_{1i} , ψ_{2i} — углы контакта двух крайних точек i -й винтовой режущей кромки, участвующих в работе.

Основное время. *Основное время* — это время рабочего хода, т.е. движения инструмента относительно детали со скоростью подачи. Для каждого прохода основное время

$$t_0 = L_{p,x}/S_m = L_{p,x}/(nS_0),$$

где $L_{p,x}$ — длина рабочего хода; $L_{p,x} = l + l_1 + l_2$; l — длина поверхности детали, по которой осуществляется перемещение в направлении подачи; l_1 — длина врезания режущей кромки до набора полной глубины резания; l_2 — перебеги инструмента или детали в направлении подачи.

Длина врезания зависит от геометрии инструмента и его конструктивных особенностей: при точении $l_1 = t \operatorname{ctg} \varphi + (0,5 \dots 2)$ мм, при сверлении $l_1 = D/(2 \operatorname{tg} \varphi) + (0,5 \dots 2)$ мм, при фрезеровании цилиндрической фрезой $l_1 = \sqrt{t(D-t)} + (0,5 \dots 2)$ мм, при симметричном фрезеровании торцовой фрезой $l_1 = 0,5(D - \sqrt{D^2 - B^2}) + (0,5 \dots 2)$ мм.

Значение 0,5...2 мм принимается для обеспечения свободного подхода инструмента к обрабатываемой поверхности.

Перебег при работе напроход составляет 1...5 мм в зависимости от размеров обработки. При работе в упор он равен нулю.

Формулы для расчета t_0 применительно к различным процессам обработки приводятся в справочной литературе.

1.5. Классификация видов резания

Используемые в настоящее время технологии обработки резанием, конструкции и геометрия инструментов, обрабатываемые материалы, широкие пределы изменения режимов резания обуславливают практически бесконечное число возможных комбинаций условий резания. Однако все они могут быть сведены к сравнительно небольшому числу основных случаев работы режущего лезвия. Их классификация может быть проведена по нижеследующим признакам.

1. По количеству участвующих в резании режущих кромок — свободное и несвободное. При *свободном резании* в работе принимает участие только одна режущая кромка (рис. 1.29). В этом случае все участки режущей кромки находятся почти в одинаковых условиях, а направления перемещения всех частиц стружки почти одинаковы.

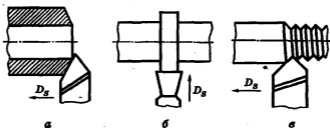


Рис. 1.29. Примеры свободного (а, б) и несвободного (в) резания

Но гораздо чаще приходится иметь дело с *несвободным резанием*, при котором вспомогательная режущая кромка в зависимости от радиуса вершины реза r_n , вспомогательного угла в плане ϕ_1 и подачи S принимает большее или меньшее участие в процессе резания. Она создает так называемое побочное резание в дополнение к главному, осуществляемому главной режущей кромкой. При этом процесс образования стружки весьма сложен, так как отдельные элементы стружки стремятся передвигаться по передней поверхности реза в различных направлениях.

2. По ориентации режущей кромки относительно вектора скорости главного движения — прямоугольное и косоугольное. Если режущая кромка перпендикулярна к направлению главного движения резания, оно является *прямоугольным*, а если не перпен-

дикулярна, — *косоугольным* (рис. 1.30). Положение режущей кромки относительно направления движения характеризуется углом наклона режущей кромки λ (см. § 1.3). В зависимости от формы главной режущей кромки и ее расположения относительно оси заготовки образуются различные формы сечения среза, а следовательно, и стружки. Сечение среза при свободном резании резцом с прямолинейной режущей кромкой, расположенной перпендикулярно к оси заготовки (рис. 1.31, а), имеет форму прямоугольника. В данном случае толщина среза постоянна и равна подаче, а $\varphi = 90^\circ$. Если прямолинейная режущая кромка при свободном резании расположена по отношению к оси заготовки под углом $\varphi \neq 90^\circ$ (рис. 1.31, б), сечение среза имеет форму параллелограмма, а толщина, как и в первом случае, постоянна, но меньше подачи.

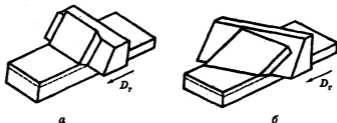


Рис. 1.30. Схемы прямоугольного (а) и косоугольного (б) резания

Несвободное резание имеет место при работе резцом с прямолинейной режущей кромкой и радиусом вершины r_n (рис. 1.31, в). В этом случае сечение среза сложное по форме. На участке ab оно имеет форму параллелограмма, а на участке bc — форму запытой; при этом на участке ab толщина постоянная, но меньше подачи, а на участке bc — переменная, но тоже меньше подачи.

При несвободном резании резцом с криволинейной режущей кромкой (рис. 1.31, г) сечение среза имеет форму запытой, а толщина, измеряемая по нормали к режущей кромке, переменная и меньше подачи.

В зависимости от соотношения подачи и глубины резания стружка называется прямой при $S < t$, квадратной при $S = t$ и обратной при $S > t$.

Основные закономерности процесса резания обычно изучают в условиях свободного прямоугольного резания, так как в этом случае он «очищается» от ряда наслоений, усложняющих наблюдение явлений.

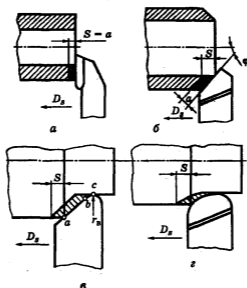


Рис. 1.31. Формы сечения срезаемого слоя при свободном и несвободном резании

3. По количеству одновременно участвующих в работе лезвий — *одно-* и *многолезвийное*. К первому виду относят точение, строгание, долбление, ко второму — сверление, фрезерование и т.д.

4. По форме сечения среза — с *постоянным* и *переменным сечениями*. К первому виду относятся, например, точение, сверление, а ко второму — фрезерование. При работе современного автоматизированного оборудования, в том числе при точении и сверлении, возможно одновременное изменение всех элементов режима резания и сечения среза.

5. По времени контакта режущего лезвия с деталью — *непрерывное* и *прерывистое*. Непрерывное резание характеризуется непрерывным контактом рабочих поверхностей лезвия с деталью; прерыв наступает только при переходе к обработке другой детали. Прерывистое резание осуществляется путем периодического повторения цикла резание — отдых лезвия. При этом существенную роль играют процессы, связанные с врезанием и выходом режущего клина из контакта с деталью.

Литература

1. ГОСТ 25762–83. Обработка резанием. Термины, определения и обозначения общих понятий.
2. Грановский Г.И. Кинематика резания / Г.И. Грановский. М.: Машгиз, 1948.

Основные свойства инструментальных

2.1. материалов

Эксплуатационные характеристики режущих инструментов в значительной степени зависят от качества материала, из которого эти инструменты изготовлены. Материалы, предназначенные для режущих инструментов, должны по ряду показателей значительно превосходить материалы, применяемые в машиностроении для изготовления различных деталей. Ниже приведены основные требования, предъявляемые к инструментальным материалам.

1. Инструментальный материал должен иметь высокую твердость в состоянии поставки или достигаемую в результате его термической обработки — не менее 62...65 HRC по Роквеллу (шкала С).

2. При резании металлов выделяется значительное количество теплоты, и режущая часть инструмента нагревается. Температура рабочих поверхностей и режущих кромок инструмента зависит от условий, при которых ведется обработка, и может достигать нескольких сот градусов. Необходимо, чтобы при значительных температурах резания твердость поверхностей инструментов существенно не уменьшалась. Способность материала сохранять высокую твердость при повышенных температурах и исходную твердость после охлаждения называется *теплостойкостью*. Инструментальный материал должен обладать высокой теплостойкостью.

3. Наряду с теплостойкостью инструментальный материал должен иметь высокую износостойкость при повышенной температуре, т.е. обладать хорошей сопротивляемостью истиранию обрабатываемым материалом.

4. Важным требованием является достаточно высокая прочность инструментального материала. Если высокая твердость материала рабочей части инструмента сопровождается значительной хрупкостью, это приводит к поломке инструмента и выкрашиванию режущих кромок.

5. Инструментальный материал должен обладать технологическими свойствами, обеспечивающими оптимальные условия изготовления из него инструментов. Для инструментальных сталей — это хорошая обрабатываемость резанием и давлением, благоприятные особенности термической обработки (малая чувствительность к перегреву и обезуглероживанию, хорошие закаливаемость и прокаливаемость, минимальные деформирование и образование трещин при закалке и т.д.), хорошая шлифуемость после термической обработки.

Для твердых сплавов первые два требования менее существенны, но зато особое значение приобретает хорошая шлифуемость, а также отсутствие трещин и других дефектов, которые возникают в твердом сплаве после припайки пластин, при шлифовании и заточке инструмента.

По мере развития промышленности значительно изменились возможности и состав используемых инструментальных материалов. Динамика их развития в XX в. показана на рис. 2.1.

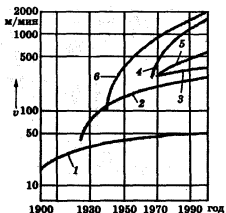


Рис. 2.1. Динамика изменения уровня скоростей резания для различных инструментальных материалов:

- 1 — быстрорежущие стали; 2 — твердые сплавы; 3 — твердые сплавы с защитными покрытиями; 4 — синтетические алмазы; 5 — материалы на основе нитрида бора; 6 — минералокерамика

Виды инструментальных материалов

2.2. и области их применения

Углеродистые и легированные инструментальные стали. Номенклатура инструментальных материалов разнообразна. Ранее других материалов для изготовления режущих инструментов начали применять *углеродистые инструментальные стали* марок У7, У7А...У13, У13А. Помимо железа и углерода эти стали содержат 0,2...0,4 % марганца. Инструменты из углеродистых сталей обладают достаточной твердостью при комнатной температуре, но теплостойкость их невелика, так как при сравнительно невысоких температурах (200...250 °С) их твердость резко уменьшается.

Легированные инструментальные стали по химическому составу отличаются от углеродистых повышенным содержанием кремния или марганца либо наличием одного или нескольких легирующих элементов: хрома (увеличивает твердость, прочность, коррозионную стойкость материала, понижает его пластичность), никеля (повышает прочность, пластичность, ударную вязкость, прокаливаемость материала), вольфрама (повышает твердость и теплостойкость материала), ванадия (повышает твердость и прочность материала, способствует образованию мелкозернистой структуры), кобальта (увеличивает ударную вязкость и жаропрочность материала), молибдена (повышает упругость, прочность, теплостойкость материала). Для режущих инструментов используются низколегированные стали марок 9ХФ, 11ХФ, 13Х, В2Ф, ХВ4, ХВСГ, ХВГ, 9ХС и др. Эти стали обладают более высокими технологическими свойствами — лучшей закаливаемостью и прокаливаемостью, меньшей склонностью к короблению, но теплостойкость их практически равна теплостойкости углеродистых сталей (350...400 °С), поэтому они используются для изготовления ручных инструментов (разверток) или инструментов, предназначенных для обработки на станках с низкими скоростями резания (мелкие сверла, развертки).

Быстрорежущие инструментальные стали. Из группы высоколегированных сталей для изготовления режущих инструментов используются быстрорежущие стали с высоким содержанием вольфрама, молибдена, кобальта, ванадия. Современные быстрорежущие стали можно разделить на три группы (табл. 2.1).

К *сталлям нормальной теплостойкости* относятся вольфрамовые Р18, Р12, Р9 и вольфрамомолибденовые Р6М5, Р6М3, Р8М3.

Эти стали имеют твердость в закаленном состоянии 62...65 HRC, предел прочности при изгибе 2900...3400 МПа, ударную вязкость 2,7... 4,8 Дж/м² и теплостойкость 600...650 °С. Указанные стали получили наиболее широкое распространение при изготовлении режущих инструментов. Они используются при обработке конструкционных сталей, чугунов, цветных металлов, пластмасс. Применяются также быстрорежущие стали, дополнительно легированные азотом (Р6АМ5, Р18А и др.), которые являются модификациями обычных быстрорежущих сталей. Легирование азотом повышает режущие свойства инструмента на 20...30 %, твердость — на 1-2 единицы HRC.

Таблица 2.1

Содержание легирующих элементов в быстрорежущих сталях, % [2]

Марка стали	С	W	Cr	V	Mo	Co
<i>Стали нормальной теплостойкости</i>						
P18	0,70...0,8	17,0...18,5	3,8...4,4	1,0...1,4	До 1,0	—
P12	0,8...0,9	12,0...13,0	3,8...4,4	1,5...1,9	До 1,0	—
P9	0,85...0,95	8,5...10,0	3,8...4,4	2,0...2,6	До 1,0	—
P6M5	0,8...0,9	5,5...6,5	3,8...4,4	1,7...2,1	5,0...5,5	—
P6M3	0,85...0,95	5,5...6,5	3,0...3,5	2,0...2,5	3,0...3,6	—
P8M3	0,8...0,9	7,6...8,4	3,6...4,0	1,6...1,9	3,0...3,5	—
P2M5	0,95...1,05	1,7...2,3	3,8...4,3	0,9...1,3	4,8...5,3	—
11M5Ф	1,0	—	3,8	1,2	5,1	—
<i>Стали повышенной теплостойкости</i>						
10P8M3	0,96...1,05	7,5...8,5	3,3...3,9	1,7...2,1	3,0...3,6	—
10P6M5	1,05	6,0	4,0	2,4	5,0	—
P12Ф3	0,94...1,04	12,0...13,5	3,5...4,0	2,5...3,3	До 1,0	—
P2M3Ф8	0,90...1,05	2,0...2,5	4,0...4,8	7,5...8,5	2,5...3,0	—
P9Ф5	1,4...1,5	9,0...10,5	3,8...4,4	4,3...5,1	До 1,0	—
P18Ф2K5	0,85...0,95	17,0...18,5	3,8...4,4	1,8...2,4	До 1,0	5,0...6,0
P6M5K5	0,8...0,90	6,0...7,0	3,8...4,3	1,7...2,2	4,8...5,8	4,8...5,3
P9K5	0,9...1,0	9,0...10,5	3,8...4,4	2,0...2,6	До 1,0	5,0...6,0
P9K10	0,9...1,0	9,0...10,5	3,8...4,4	2,0...2,6	До 1,0	9,5...10,5
P9M4K8Ф	1,0...1,1	8,5...9,6	3,0...3,6	2,1...2,5	3,8...4,3	7,5...8,5
10P6M5Ф2	1,0	5,75	4,1	2,1	6,0	8,0

Окончание табл. 2.1

Марка стали	C	W	Cr	V	Mo	Co
P3M3Ф4К5	1,0	3,0	4,0	4,0	3,0	5,0
A11P3M3Ф	1,02...1,12	2,5...3,3	3,8...4,4	2,2...2,7	2,5...3,0	—
<i>Стали высокой теплостойкости</i>						
B11M7K23	0,1	11	—	0,5	7	23
B14M7K25	0,1	14	—	0,5	7	25
3B20K20X4	0,25	20	4,0	1,0	—	20

Стали повышенной теплостойкости характеризуются повышенным содержанием углерода (10P8M3, 10P6M5), ванадия (P12Ф3, P2M3Ф8, P9Ф5), кобальта (P18Ф2К5, P6M5K5, P9K5, P9K10, P9M4K8Ф, 10P6M5Ф2К8 и др.).

Твердость сталей в закаленном состоянии достигает 65...69 HRC, они имеют более высокую теплостойкость (до 620...670 °С). Это дает возможность использовать их для обработки жаропрочных и нержавеющих сталей и сплавов, а также конструкционных сталей повышенной прочности и закаленных. Период стойкости инструментов из таких сталей в 3–5 раз выше, чем из сталей P18, P6M5.

Стали высокой теплостойкости характеризуются пониженным содержанием углерода, но весьма большим количеством легирующих элементов (B11M7K23, B14M7K25, 3B20K20X4Ф). Они имеют твердость 68...69 HRC и теплостойкость 700...720 °С. Наиболее рациональная область их использования — резание труднообрабатываемых материалов и титановых сплавов. В последнем случае период стойкости инструментов в 30–80 раз выше, чем из стали P18, и в 8–15 раз выше, чем из твердого сплава BK8. При резании конструкционных сталей и чугунов период стойкости возрастает менее значительно (в 3–8 раз).

Находят применение также маловольфрамовые (P2M5, P3M3Ф4К5, P2M3Ф8, A11P3M3Ф2) и безвольфрамовая (11M5Ф) стали. Эксплуатационные свойства указанных сталей близки к свойствам традиционных быстрорежущих сталей соответствующих групп.

Перспективным для повышения качества быстрорежущих сталей является получение их методами порошковой металлургии. Стали P6M5K5-II (II — порошковая), P9M4K8-II, P12M3Ф3K10-II и другие имеют весьма однородную мелкозернистую структуру, хорошо шлифуются, меньше деформируются при термообработке, отличаются стабильностью эксплуатационных свойств. Период стойкости режущих инструментов из таких сталей значительно возрастает. Наряду с по-

рошковыми быстрорежущими сталями хорошо зарекомендовали себя так называемые карбидостали, содержащие до 20 % TiC, которые по служебным характеристикам занимают промежуточное положение между быстрорежущими сталями и твердыми сплавами.

Твердые сплавы. Эти сплавы получают методами порошковой металлургии в виде пластин или коронок. Основными компонентами таких сплавов являются карбиды вольфрама WC, титана TiC, тантала TaC и ниобия NbC, мельчайшие частицы которых соединены посредством сравнительно мягких и менее тугоплавких кобальта или никеля в смеси с молибденом (табл. 2.2, 2.3).

Таблица 2.2

Марки, химический состав и свойства вольфрамсодержащих твердых сплавов [3]

Группа сплавов	Марка сплава	Состав сплава, %				Физико-механические свойства	
		Карбид вольфрама	Карбид титана	Карбид тантала	Кобальт	Предел прочности при изгибе, МПа, не менее	Твердость HRA, не менее
BK	BK3	97	—	—	3	1176	89,5
	BK3-M	97	—	—	3	1176	91,0
	BK4	96	—	—	4	1519	89,5
	BK4-B	96	—	—	4	1470	88,0
	BK6	94	—	—	6	1519	88,5
	BK6-M	94	—	—	6	1421	90,0
	BK6-OM	92	—	2	6	1274	90,5
	BK6-B	94	—	—	6	1666	87,5
	BK8	92	—	—	8	1666	87,5
	BK8-B	92	—	—	8	1813	86,5
TK	T5K10	85	5	—	10	1421	88,5
	T15K6	79	15	—	6	1176	90,0
	T14K8	78	14	—	8	1274	89,5
	T3OK4	66	30	—	4	980	92,0
TTK	TT7K12	81	4	3	12	1666	87,0
	TT8K6	84	8	2	6	1323	90,5
	TT10K8-B	82	3	7*	8	1617	89,0
	TT20K9	71	8	12	9	1470	89,0

* В смеси с карбидами ниобия.

Таблица 2.3

**Марки, химический состав и свойства безвольфрамовых
твердых сплавов [3]**

Марка сплава	Состав сплава, %					Физико-механические свойства	
	Карбиды титана и ниобия	Карбонитриды титана	Карбиды титана	Никель	Молибден	Предел прочности при изгибе, МПа, не менее	Твердость HRA, не менее
TM-1	90	—	—	5	5	764	92
TM-3	64	—	—	21	15	1176	89
TH-20	—	—	79	15	6	1050	90
KHT-16	—	74	—	19,5	6,5	1200	89

Твердые сплавы имеют высокую твердость — 88...92 HRA (71...75 HRC) и теплостойкость до 850...1000 °С. Это позволяет работать со скоростями резания в 3–4 раза большими, чем инструментами из быстрорежущих сталей.

Применяемые в настоящее время твердые сплавы делятся:

1) на *вольфрамовые сплавы* группы ВК (ВК3, ВК3-М, ВК4, ВК6, ВК6-М, ВК6-ОМ, ВК8 и др.). В условном обозначении цифра показывает процентное содержание кобальта. Например, обозначение ВК8 показывает, что в нем 8 % кобальта и 92 % карбидов вольфрама. Буквами М и ОМ обозначается мелкозернистая и особо мелкозернистая структура;

2) *титановольфрамовые сплавы* группы ТК (Т5К10, Т15К6, Т14К8, Т30К4, Т60К6 и др.). В условном обозначении цифра, стоящая после буквы Т, показывает процентное содержание карбидов титана, после буквы К — кобальта, остальное — карбиды вольфрама;

3) *титанотанталовольфрамовые сплавы* группы ТТК (ТТ7К12, ТТ8К6, ТТ20К9 и др.). В условном обозначении цифры, стоящие после буквы Т, показывают процентное содержание карбидов титана и тантала, после буквы К — кобальта, остальное — карбиды вольфрама;

4) *безвольфрамовые твердые сплавы* (TM-1, TM-3, TH-20, KHT-16, ТС20ХН), состав которых приведен в табл. 2.3. Обозначения этой группы твердых сплавов условные.

Твердые сплавы выпускаются в виде стандартизованных пластин, которые припаиваются, приклеиваются или крепятся меха-

тически к державкам из конструкционной стали. Выпускаются также инструменты, рабочая часть которых целиком выполнена из твердого сплава (монокристаллы).

Правильный выбор марки твердого сплава обеспечивает эффективную эксплуатацию режущих инструментов. Для конкретного случая обработки сплав выбирают исходя из оптимального сочетания его теплостойкости и прочности. Например, сплавы группы ТК имеют более высокую теплостойкость, чем сплавы ВК. Инструменты, изготовленные из этих сплавов, могут использоваться при высоких скоростях резания, поэтому их широко применяют при обработке сталей.

Инструменты из твердых сплавов группы ВК применяют при обработке деталей из конструкционных сталей в условиях низкой жесткости технологической системы, при прерывистом резании, работе с ударами, а также при обработке хрупких материалов типа чугуна, что обусловлено повышенной прочностью этой группы твердых сплавов и невысокими температурами в зоне резания. Такие сплавы используются также при обработке деталей из высокопрочных, жаропрочных и нержавеющей сталей, титановых сплавов. Это объясняется тем, что наличие в них титана вызывает повышенную адгезию со сплавами группы ТК, также содержащими титан. Кроме того, сплавы группы ТК имеют значительно худшую теплопроводность и более низкую прочность, чем сплавы ВК.

Введение в твердый сплав карбидов тантала или карбидов тантала и ниобия (ТГ10К8-В) повышает его прочность. Поэтому трех- и четырехкарбидные твердые сплавы применяются для оснащения инструментов, работающих с ударами и по загрязненной корке. Однако температура теплостойкости этих сплавов ниже, чем у двухкарбидных. Из твердых сплавов с существенно улучшенной структурой следует отметить особомелкозернистые, применяемые для обработки материалов с большой истирающей способностью. Сплавы ОМ обладают плотной, особомелкозернистой структурой, а также имеют малый (до 0,5 мкм) размер зерен карбидов вольфрама. Последнее обстоятельство позволяет затачивать и доводить изготовленный из них инструмент с наименьшими радиусами режущих кромок. Инструменты из сплавов этой группы применяются для чистовой и получистовой обработки деталей из высокопрочных вязких сталей с повышенной склонностью к наклепу.

Закономерности изменения свойств твердых сплавов в зависимости от размеров зерен приведены в табл. 2.4.

Таблица 2.4

Физико-механические свойства твердых сплавов разной зернистости [4]

Марка сплава	Средний размер карбидной фазы, мкм	Предел прочности при изгибе, МПа, не менее	Предел прочности на сжатие, МПа	Твердость HRA, не менее	Модуль упругости, ГПа
ВК6-ОМ	1,3	1270	—	90,5	—
ВК6-М	1,6	1421	4910±240	90,0	645
ВК6	2,0	1519	4390±280	88,5	640
ВК6В	3,4	1660	3680±140	87,5	635
Т5К12	1,7	1550	—	89,3	—
	2,4	1570	—	89,2	—
	2,6	1720	—	88,9	—
	3,5	1810	—	87,5	—

Незначительная добавка в состав сплавов группы ОМ карбида тантала и кобальта способствует повышению их теплостойкости, что позволяет использовать эти сплавы при изготовлении инструментов, предназначенных для черновой обработки деталей из различных сталей. Весьма эффективна замена карбидов тантала карбидами хрома. Это обеспечивает получение сплавов с мелкозернистой однородной структурой и высокой износостойкостью [4]. Представителем таких материалов является сплав ВК10-ХОМ.

Сплавы с низким процентным содержанием кобальта (Т30К4, ВК3, ВК4) обладают меньшей вязкостью и применяются для изготовления инструментов, срезающих тонкие стружки на чистовых операциях. Наоборот, сплавы с большим содержанием кобальта (ВК8, Т14К8, Т5К10) являются более вязкими и применяются при снятии стружек большого сечения на черновых операциях.

В настоящее время в промышленности широко используют инструменты, оснащенные твердыми сплавами зарубежного производства. В этом случае принято обозначение твердых сплавов по ISO 513: 2004. Такие сплавы включают три группы — Р, К и М, состоящие из нескольких подгрупп, например Р01, Р10, Р20, ..., Р40 (табл. 2.5). Чем выше индекс в группе, тем ниже износостойкость сплава и уровень допустимых скоростей резания и выше прочность и допустимые сечения среза.

Таблица 2.5

Марки и области применения твердых сплавов по ISO

Группа сплавов	Марка сплава	Область применения
P	01	Чистовая и получистовая обработка стали и стального литья при благоприятных условиях. Рекомендуются высокие скорости резания и небольшие подачи без использования СОЖ
	10	
	15	
	20	Чистовая и получистовая обработка стали, стального литья, ковкого и модифицированного чугунов, образующих сливную стружку
	25	
	30	Черновая и получистовая обработка стали, стального литья, ковкого и модифицированного чугунов. Относительно высокие скорости резания и подачи
35		
40		
	50	
M	10	Чистовая и получистовая обработка жаропрочных и нержавеющей сталей. Сравнительно высокие скорости резания и небольшие подачи
	20	Чистовая и получистовая обработка жаропрочных и нержавеющей сталей
	30	
40	Черновая и получистовая обработка жаропрочных и нержавеющей сталей по корке и окалине. Рекомендуются низкие скорости резания, значительные подачи	
K	01	Чистовая и получистовая обработка легированного чугуна, медных сплавов
	05	
	10	
	15	Чистовая и получистовая обработка серого чугуна, обработка ковкого и модифицированного чугунов
	20	
	25	Обработка чугунов и медных сплавов в неблагоприятных условиях. Рекомендуются невысокие скорости резания, значительные подачи
30		

В последнее время в результате совершенствования химического состава твердых сплавов увеличено количество их групп и принята новая классификация (табл. 2.6).

Работоспособность твердых сплавов значительно возрастает при нанесении на них износостойких покрытий (см. гл. 9).

Минералокерамика. Из современных инструментальных материалов заслуживает внимания минералокерамика, которая не содержит дорогостоящих и дефицитных элементов. Основу ее составляют оксиды алюминия Al_2O_3 с небольшой добавкой (0,5...1 %)

оксида магния MgO. Высокая твердость минералокерамики, теплоустойчивость до 1200 °С, химическая инертность к металлам, сопротивление окислению во многом превосходят эти же параметры твердых сплавов. Однако минералокерамика уступает этим сплавам по теплопроводности, имеет более низкий предел прочности на изгиб.

Таблица 2.6

Классификация и области применения* твердых сплавов

Обозначение группы твердых сплавов	Группа обрабатываемых материалов
P	Углеродистые и легированные конструкционные и инструментальные стали
M	Нержавеющие стали аустенитного класса
K	Чугуны серые и ковкие
N	Медь, алюминий и их сплавы, пластмассы
S	Жаропрочные и титановые сплавы
H	Стали и чугуны в закаленном состоянии

* В зависимости от вида обработки (точение, сверление, фрезерование) области применения твердых сплавов могут изменяться.

Современная минералокерамика по прочности приближается к наиболее износостойким твердым сплавам. Минералокерамику на основе оксида алюминия можно разделить на три группы:

1) чисто оксидная керамика (белая), основу которой составляет оксид алюминия с незначительными примесями (Al_2O_3 — до 99,7 %); 2) керамика, представляющая собой оксид алюминия с добавлением металлов (титан, ниобий и др.); 3) оксидно-карбидная (черная) керамика — оксид алюминия с добавлением карбидов тугоплавких металлов (титана, вольфрама, молибдена) для повышения ее прочностных свойств и твердости.

В настоящее время выпускается оксидная керамика ЦМ-332, ВО-13 и оксидно-карбидная ВЗ, ВОК-60, ВОК-63, в состав которой входит до 40 % карбидов титана, вольфрама и молибдена. Наряду с материалами на основе оксида алюминия выпускается материал на основе нитрида кремния — силинит-Р и кортинит ОНТ-20 (с добавками оксидов алюминия и некоторых других веществ). Физико-механические свойства режущей минералокерамики, выпускаемой в странах СНГ, а также рядом зарубежных фирм, приведены в табл. 2.7–2.9.

Таблица 2.7

**Физико-механические свойства минералокерамики
производства стран СНГ [1, 5]**

Марка	Плотность, г/см ³ , не менее	Твердость, HRA	Предел прочности на изгиб, МПа, не менее
ЦМ-332	3,85	90...92	295...350
ВО-13	3,95	90...92	450...500
ОНТ-20	4,3	92...94	500...650
ВЗ	4,5	92...94	560...600
ВОК-60	4,2	92...94	560...600
ВОК-65	4,2	92...93	635...700
Силлинт-Р	—	94...96	500...700

Высокие режущие свойства инструментов из минералокерамики проявляются при скоростной обработке сталей и высокопрочных чугунов, причем чистовое и получистовое точение и фрезерование повышают производительность обработки деталей до 2 раз при одновременном возрастании периодов стойкости инструментов до 5 раз по сравнению с обработкой инструментами из твердого сплава. Минералокерамика выпускается в виде неперетачиваемых пластин, что существенно облегчает условия ее эксплуатации.

Сверхтвердые инструментальные материалы. Одним из направлений совершенствования режущих свойств инструментов, позволяющим повысить производительность труда при механической обработке, является увеличение твердости и теплостойкости инструментальных материалов. Наиболее перспективными в этом отношении являются синтетические сверхтвердые материалы (СТМ) на основе алмаза и нитрида бора.

Алмазы и алмазные инструменты широко используются при обработке деталей из различных материалов. Для алмазов характерны исключительно высокие твердость и износостойкость. По абсолютной твердости алмаз в 4–5 раз тверже твердых сплавов и в десятки и сотни раз превышает износостойкость других инструментальных материалов при обработке цветных сплавов и пластмасс. Кроме того, вследствие высокой теплопроводности алмазы лучше отводят тепло из зоны резания, что способствует гарантированному получению деталей без прижогов на поверхности. Однако алмазы весьма хрупки, что сильно сужает область их применения.

Таблица 2.8

Физико-механические свойства керамики «Krupp-Widia» [8]

Свойство	Разновидность							
	оксидная				нитридная			
	WTDALOX8	WTDALOXU	WTDALOXK	WTDALOXH	WTDALOXI	WTDALOXJ	WTDALOXK	WTDALOXL
Плотность, г/см ³	4,02	4,16	4,12	4,25	3,91	3,16	3,26	3,25
Твердость HV	1730	1700	1730	1930	1800	1600	1400	1800
Предел прочности на изгиб, МПа	700	800	650	620	1000	900	1000	945
Предел прочности на сжатие, МПа	5000	4700	4800	4800	5000	5500	5500	>3500

Таблица 2.9

Физико-механические свойства керамики «Feldmühle» [7, 9]

Свойство	Разновидность							
	оксидная*				оксидно-карбидная			
	SN 56	SN 60	SN 80	SH 1	FH 3	SH 20F	SL 200	SL 100
Плотность, г/см ³	3,91	3,97	3,97	4,30	4,20	4,20	3,30	3,20
Твердость HV	2400	2200	2200	3000	2800	2200	2100	1800
Предел прочности на изгиб, МПа	350	600	800	380	360	600	1000	720

Для изготовления режущих инструментов основное применение получили искусственные алмазы, которые по своим свойствам близки к естественным. При больших давлениях и температурах в искусственных алмазах удается получить такое же расположение атомов углерода, как и в естественных. Масса одного искусственного алмаза обычно составляет $1/8 \dots 1/10$ карата (1 карат — 0,2 г). Вследствие малости размеров искусственных кристаллов они непригодны для изготовления таких инструментов, как сверла, резцы и другие, а поэтому применяются при изготовлении порошков для алмазных шлифовальных кругов и притирочных паст (см. гл. 10).

Лезвийные алмазные инструменты выпускаются на основе поликристаллических материалов типа «карбонадо» или «баллас». Эти инструменты имеют длительные размерные периоды стойкости и обеспечивают высокое качество обработанной поверхности. Применяются они при обработке титановых, высококремнистых алюминиевых сплавов, стеклопластиков и пластмасс, твердых сплавов и других материалов.

Алмаз как инструментальный материал имеет существенный недостаток: при повышенной температуре он вступает в химическую реакцию с железом и теряет работоспособность. Для того чтобы обрабатывать стали, чугуны и другие материалы на основе железа, созданы сверхтвердые материалы, химически инертные к нему. Такие материалы получены по технологии, близкой к технологии получения алмазов, но в качестве исходного вещества используется не графит, а нитрид бора.

Поликристаллы плотных модификаций нитрида бора превосходят по теплостойкости все материалы, применяемые для лезвийного инструмента: алмаз — в 1,9 раза, быстрорежущую сталь — в 2,3 раза, твердый сплав — в 1,7 раза, минералокерамику — в 1,2 раза [5, 6].

Эти материалы изотропны (одинаковая прочность в различных направлениях), обладают микротвердостью, близкой к твердости алмаза, повышенной теплостойкостью, высокой теплопроводностью и химической инертностью по отношению к углероду и железу.

Характеристики некоторых из рассматриваемых материалов, которые в настоящее время получили название «композит», приведены в табл. 2.10.

Эффективность применения лезвийных инструментов из различных марок композитов связана с совершенствованием конструкций инструментов и технологии их изготовления и с определением рациональной области их использования: композиты 01 и 02 применяют для тонкого и чистового точения и фрезерования без

ударов деталей из закаленных сталей твердостью 54...69 HRC, чугунов и твердых сплавов BK15, BK20 и BK25 с подачами до 0,20 мм/об и глубиной резания до 0,8 мм; композит 05 применяют для чистового и получистового точения без ударов деталей из закаленных сталей твердостью 39...57 HRC, чугунов твердостью до 300 HB с подачами до 0,25 мм/об и глубиной до 2,5 мм; композит 10 используют для тонкого, чистового и получистового точения и фрезерования с ударами деталей из закаленных сталей твердостью 29...57 HRC, чугунов любой твердости, сплавов BK15, BK20, BK25 с подачей до 0,15 мм/об и глубиной резания до 0,6 мм. При этом период стойкости инструментов возрастает в десятки раз по сравнению с другими инструментальными материалами.

Таблица 2.10

Сравнительные характеристики СТМ на основе нитрида бора

Марка материала	Твердость HV, ГПа	Теплостойкость, °С
Композит 01	60...80	1100...1300
Композит 02	60...90	900...1000
Композит 03	60	1000
Композит 05	70	1000
Композит 09	60...90	1500
Композит 10	50...90	750...850

До недавнего времени область применения СТМ ограничивалась из-за сравнительно небольших размеров поликристаллов. Сейчас освоен выпуск двухслойных непереключаемых пластин, состоящих из твердого сплава (основа) и слоя из поликристаллов алмаза или нитрида бора толщиной до 0,5 мм, что повышает общую эффективность использования инструментов из сверхтвердых материалов.

Монокристаллические материалы. В качестве инструментальных материалов находят применение также синтетический корунд в виде рубина и монокристаллы бесцветного корунда, или лейкосапфиры.

Рубин представляет собой модификацию $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ с небольшими примесями хрома, а лейкосапфир — синтетический монокристалл в виде α -модификации, который почти не содержит примесей. Последний имеет лучшие механические свойства, чем рубин, в силу чего и находит более широкое применение. Инструменты, изготовленные из монокристаллов корунда, рекомендуется использовать для тонкой обработки цветных металлов, сталей и чугунов.

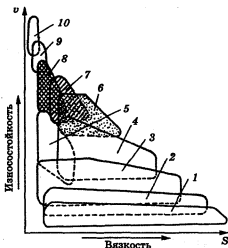


Рис. 2.2. Взаимосвязи допустимых режимов резания с износостойкостью и прочностью инструментальных материалов:

- 1 — быстрорежущие стали; 2 — быстрорежущие стали с покрытиями;
 3 — твердые сплавы; 4 — твердые сплавы с покрытиями; 5 — керметы;
 6 — нитридная керамика; 7 — оксидно-карбидная керамика; 8 — оксидная керамика; 9 — материалы на основе нитрида бора; 10 — алмазы

Следует еще раз подчеркнуть, что используемая в настоящее время номенклатура инструментальных материалов весьма широка и обеспечивает высокопроизводительную обработку современных конструкционных материалов. Некоторые общие рекомендации по выбору инструментальных материалов даны на рис. 2.2.

Литература

1. ГОСТ 26630-85. Материалы керамические инструментальные. Марки.
2. ГОСТ 19265-73. Прутки и полосы из быстрорежущей стали. Технические условия.
3. ГОСТ 3882-74. Сплавы твердые спеченные. Марки.
4. Металлообрабатывающий твердосплавный инструмент: Справочник / В.С. Самойлов [и др.]. М.: Машиностроение, 1988.
5. Режущие инструменты, оснащенные сверхтвердыми и керамическими материалами и их применение: Справочник / В.П. Жедь [и др.]. М.: Машиностроение, 1987.

6. Эльбор в машиностроении / Под ред. В.С. Лысанова. Л.: Машиностроение, 1978.
7. Grzesik W. Podstawy skrawania materiałów metalowych / W. Grzesik. Warszawa: WNT, 1998.
8. Przybylski L. Strategia doboru warunków obróbki współczesnymi narzędziami / L. Przybylski. Kraków: Politechnika Krakowska, 2000.
9. Wysięcki M. Nowoczesne materiały narzędziowe / M. Wysięcki. Warszawa: WNT, 1997.

Общие сведения о пластической

3.1. деформации металла в зоне резания

При обработке резанием превращение срезаемого слоя в стружку является одной из разновидностей процесса пластического деформирования материала, выражающейся в изменении под действием внешней силы формы деформируемого тела без его разрушения.

Различают три основных вида деформированного состояния тела.

1. Растяжение, при котором вдоль одной из трех главных осей деформации x , y , z наблюдается удлинение, а вдоль остальных двух — укорочение деформируемого тела (рис. 3.1, а).

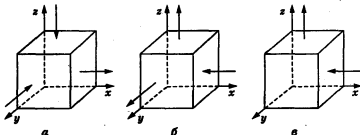


Рис. 3.1. Три основных вида деформированного состояния тела

2. Сжатие, при котором вдоль одной из главных осей деформации наблюдается укорочение тела, а вдоль остальных двух — его удлинение (рис. 3.1, б). Если деформации удлинения равны между собой, сжатие называется *простым*.

3. Сдвиг, при котором деформация тела вдоль одной из главных осей отсутствует, вдоль второй оси происходит укорочение, а вдоль третьей главной оси — равное ему удлинение (рис. 3.1, в).

Различают чистый и простой сдвиги. При *чистом сдвиге* (рис. 3.2, а) происходит равномерное укорочение тела вдоль одной оси и равномерное его удлинение вдоль другой, перпендикулярной к первой. Квадрат $ABCD$ превращается в равновеликий ромб $A_1B_1C_1D_1$ при неизменном объеме тела.

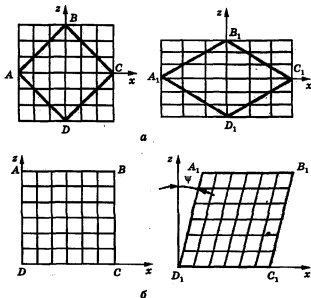


Рис. 3.2. Схемы деформации при чистом (а) и простом (б) сдвиге

Простой сдвиг (рис. 3.2, б) сопровождается смещением всех точек тела параллельно одной оси. При этом квадрат $ABCD$ превращается в равновеликий параллелограмм $A_1B_1C_1D_1$, основание и высота которого такие же, как и у исходного квадрата.

Растяжение и сжатие тела относятся к объемному, а его сдвиг — к плоскому деформированному состоянию.

Рассмотрим более подробно деформацию простого сдвига на примере перехода срезаемого слоя в стружку при металлообработке, так как при $b \gg a$ практически все перемещения срезаемого слоя происходят в одной плоскости.

Частица срезаемого слоя, находящаяся далеко от режущего инструмента, свободна от напряжений и движется по направлению

к инструменту с постоянной скоростью. По мере приближения к режущему инструменту напряжения в рассматриваемой частице возрастают. Когда они превзойдут предел упругости обрабатываемого материала, частица получит пластическое смещение и изменит направление своего движения. Эти изменения происходят за время пребывания частицы в некоторой переходной пластически деформированной зоне $ABCD$ (рис. 3.3, a). Поскольку в результате отделения слоя металла толщиной a и превращения его в стружку часть единого тела движется параллельно передней поверхности лезвия инструмента, а оставшаяся часть продолжает движение в прежнем направлении, то в точке, соответствующей сопряжению передней и задней поверхностей инструмента, под углом Φ к направлению движения, называемым *углом сдвига*, произойдет разделение тела на стружку и обрабатываемую деталь.

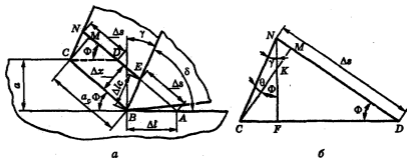


Рис. 3.3. Схема к расчету относительного сдвига

Представим переходную пластически деформируемую зону в виде параллелограмма $ABCD$ (рис. 3.3, a), а линии скольжения в ней примем за прямые. Толщину этой зоны обозначим через Δx , а ее сдвиг — через Δs . Значение Δs соответствует расстоянию (см. рис. 3.2, b), на которое сдвинулась верхняя сторона квадрата относительно нижней, и называется *абсолютным сдвигом*. В теории пластических деформаций для характеристики интенсивности сдвига пользуются величиной ϵ , называемой *относительным сдвигом*. Он равен отношению абсолютного сдвига Δs к толщине слоя Δx , претерпевшего этот сдвиг, т.е. $\epsilon = \Delta s / \Delta x$. Геометрически ϵ равен тангенсу угла ψ наклона стороны квадрата к оси z , т.е. $\epsilon = \operatorname{tg} \psi$ (см. рис. 3.2, b).

Элемент срезаемого слоя $ABCD$ под действием режущего клина инструмента деформируется и принимает форму параллелограмма $EBCN$. В треугольнике CDN (рис. 3.3, б)

$$MC = \Delta x; \angle CMD = 90^\circ; \angle KNC = \gamma; \angle NDC = \Phi;$$

$$ND = \Delta s; \angle FKC = \Phi; \angle NCK = \theta;$$

$$\varepsilon = \Delta s / \Delta x = ND / MC = MD / MC + MN / MC = \operatorname{ctg} \Phi + \operatorname{tg}(\Phi - \gamma). \quad (3.1)$$

Анализ формулы (3.1) показывает, что для расчета относительного сдвига при определенном угле γ необходимо знать угол сдвига. Его можно определить по длине стружки. При перемещении инструмента на Δl длина стружки равна Δl_c . Из треугольника ABE (рис. 3.3, а) получим:

$$\frac{\Delta l_c}{\sin \Phi} = \frac{\Delta l}{\sin \delta} = \frac{\Delta l}{\cos(\Phi - \gamma)}; \quad \Delta l_c = \frac{\cos(\Phi - \gamma)}{\sin \Phi} \Delta l.$$

Отношение $\Delta l / \Delta l_c = K_1$ получило название *коэффициента усадки* или *коэффициента укорочения стружки*:

$$K_1 = \frac{\cos(\Phi - \gamma)}{\sin \Phi}. \quad (3.2)$$

С помощью данной формулы можно после преобразований выразить угол сдвига через коэффициент K_1 :

$$\operatorname{tg} \Phi = \frac{\cos \gamma}{K_1 - \sin \gamma}.$$

Несмотря на принятые допущения о замене зоны первичной деформации единственной плоскостью сдвига и идеализации процесса превращения срезаемого слоя в стружку, формула (3.2) совершенно точно выражает связь между K_1 и углом сдвига Φ , так как отражает условие сплошности материала стружки.

Таким образом, относительный сдвиг при резании зависит от угла сдвига Φ и переднего угла γ . Угол Φ можно определить, зная толщину среза a и толщину стружки a_c , а γ всегда известен. Практически $\varepsilon = 2 \dots 5$. Определим, при каком Φ относительный сдвиг будет минимальным. Для этого возьмем первую производную уравнения (3.1), приравняем ее нулю и решим уравнение относительно Φ :

$$d\varepsilon/d\Phi = -\operatorname{cosec}^2 \Phi + \sec^2(\Phi - \gamma) = 0.$$

Это условие справедливо при $\Phi = 90^\circ - (\Phi - \gamma)$. Тогда $\Phi_{\epsilon \rightarrow \min} = 45^\circ + \gamma/2$. Зная относительный сдвиг, можно определить *скорость деформации* (с^{-1}), которая представляет собой отношение максимальной главной деформации ϵ_{\max} к ее продолжительности $\tau_{\text{деф}}$, т.е. $v_{\text{деф}} = \epsilon_{\max}/\tau_{\text{деф}}$.

В случае неравномерной деформации сдвига ее скорость, или *скорость относительного сдвига*, определяется как относительный сдвиг в единицу времени: $v_{\text{деф}} = d\epsilon/d\tau$.

От $v_{\text{деф}}$ зависит температура, сопровождающая процесс деформации: чем выше скорость деформации, тем меньше требуется для этого энергии и меньше тепловыделение. Пластические деформации материала срезаемого слоя при резании ограничиваются зоной стружкообразования. Наиболее интенсивно пластическая деформация протекает в очень узкой зоне, ширину которой для упрощения расчетов примем за прямоугольник толщиной Δx . Время деформации обрабатываемого металла на этом участке составит $\tau_{\text{деф}} = \Delta x/v_c = \Delta x K_I/v$, т.е. $v_{\text{деф}} = \epsilon v/(\Delta x K_I)$.

При резании скорость деформации очень высока и даже самые низкие скорости резания значительно превосходят скорости, достигаемые при испытаниях металлических образцов на удар. Согласно данным, приведенным в работе [6], при обработке конструкционных материалов обычного качества $\Delta x = 0,02 \dots 0,005$ см, $\epsilon = 2 \dots 5$, $K_I = 2 \dots 4$. При скорости резания 60 м/мин $= 100$ см/с скорость деформации $v_{\text{деф}} \approx 4000$ с^{-1} .

Высокие скорости деформации не позволяют установить четкую границу между хрупкими и пластичными материалами, поскольку один и тот же материал в зависимости от характера напряженного состояния при резании и скорости деформации может вести себя и как хрупкий, и как пластичный. Так, например, при точении чугуна стружка может быть сливной, при обработке вязких сталей — элементной.

3.2. Виды стружки и условия ее образования

Впервые классификацию стружки предложил в 1877 г. И.А. Тиме: стружка сливная (рис. 3.4, а), скальвания, или суставчатая (рис. 3.4, б), элементная (рис. 3.4, в) и надлома (рис. 3.4, г). *Стружка скальвания* состоит из отдельных элементов. Поверхность стружки, контактирующая с передней поверхностью реза, гладкая. Она образуется в результате обработки сталей и других пластичных ма-

териалов при большой толщине срезаемого слоя, относительно низкой скорости резания и небольшом переднем угле γ лезвия. При уменьшении толщины среза, повышении скорости резания и увеличении переднего угла отдельные элементы стружки становятся менее отчетливыми и сходят без зазубрин на ее внешней стороне (*сливная стружка*). Если увеличить толщину среза, уменьшить скорость резания и передний угол γ , отдельные элементы стружки будут менее связанными, т.е. образуется *элементная стружка*. Эти три вида стружки получаются при обработке пластичных металлов.

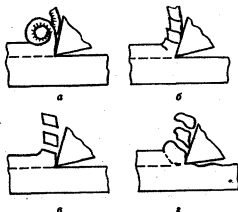


Рис. 3.4. Виды стружек

В случае обработки хрупких материалов при больших толщинах среза и больших передних углах происходит вырывание или откалывание крупных частей металла неправильной формы. Получаемая при этом стружка называется *стружкой надлома*. Она образуется, например, при обработке чугуна, который плохо сопротивляется растяжению. При больших передних углах в срезаемом слое появляются напряжения отрыва, которые способствуют выламыванию кусков металла. Если увеличить скорость резания, при обработке чугуна образуется элементная стружка, а при очень высоких скоростях чугун даст сливную стружку, хотя по сравнению со стальной прочность ее низка.

Классификация И.А. Тиме не потеряла своего значения и в наше время, хотя и подверглась конкретизации. На рис. 3.5 приведены типовые формы стружки, возникающие при обработке стали, согласно классификации ISO.



















Формы стружек							
1. Лента	2. Плоскоребричатая спираль	3. Плоская спираль	4. Выточенная зрчатая спираль	5. Выточенная коническая спираль	6. Одноветвистые	7. Элементарная	8. Игольчатая
1.1. Длинная	2.1. Длинная	3.1. Плоская	4.1. Длинная	5.1. Длинная	6.1. Связанные ленты		
1.2. Короткая	2.2. Короткая	3.2. Коническая	4.2. Короткая	5.2. Короткая	6.2. Отдельные ленты		
1.3. Путаная	2.3. Путаная		4.3. Путаная	5.3. Путаная			
							
							
							

Рис. 3.5. Формы стальной стружки

В последние годы развитие технологий механической обработки деталей и усовершенствования оборудования привело к дальнейшему развитию и совершенствованию классификации стружек. Установлено, что при сверхвысоких скоростях резания возникают настолько большие градиенты температур и скорости деформирования, что происходит резкое снижение предела пластичности (материал становится хрупким). Это наблюдается в чрезвычайно узких зонах срезаемого слоя (толщиной 200...400 мкм), которые отделены друг от друга сильно деформированными слоями толщиной 2...4 мкм, в которых успевает произойти упрочнение обрабатываемого материала. В результате формируется стружка, которая получила название *сегментированной (пилообразной)*.

Механизмы образования стружки при свободном прямоугольном резании

3.3.

Формализованная модель зоны стружкообразования. Свободная поверхность стружки всегда неровная; обычно на ней заметны мелкие волны или зазубрины. Даже на прочной сливной стружке часто можно наблюдать трещины, надрывы. Поскольку полное описание механизма образования стружки сложно, для анализа напряжений и деформаций при резании реальный процесс стружкообразования заменяют его упрощенной моделью. В частности, не принимается во внимание искажение формы полученного сечения реальной стружки и увеличение ее ширины; поперечное сечение стружки представляют в виде прямоугольника высотой, равной средней толщине стружки, и шириной, равной первоначальной ширине резания. При этих допущениях образование стружки рассматривается в идеализированном сечении по нормали к режущей кромке резца при свободном прямоугольном резании. На практике такое сечение можно увидеть, изготовив шлиф корня стружки (рис. 3.6, а) с помощью специальных устройств для мгновенной останковки процесса резания. Анализ шлифов позволяет предложить следующий механизм стружкообразования.

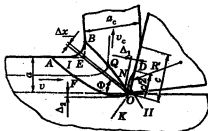
Режущий клин действует на срезаемый слой толщиной a на контактной площадке шириной c (рис. 3.6, б). Сила R , с которой инструмент передней поверхностью давит на срезаемый слой, получила название *силы стружкообразования*. Линия OK разграничивает области сжимающих (слева от OK) и растягивающих (справа от

ОК) напряжений в обрабатываемом материале ниже поверхности резания.

Зона *I*, обозначенная *OABNO* и расположенная перед передней поверхностью инструмента, является зоной первичной деформации. Она имеет форму клина с вершиной, совпадающей с вершиной инструмента. Нижняя граница *OA* зоны *I* вогнута и пересекает продольные поверхности резания. По длине она в 2–4 раза больше выпуклой верхней границы *OB* зоны *I*. Обрабатываемая поверхность плавно сопрягается со свободной стороной стружки по линии *AB*. Правее линии *OB* находятся зерна стружки, а левее линии *OA* — недеформированные зерна материала срезаемого слоя. Зерно материала срезаемого слоя, перемещаясь относительно инструмента со скоростью *v*, проходит по траектории своего движения (кривая *FQ*) и сильно деформируется. Деформация зерна заканчивается в точке *Q*, и оно приобретает скорость *v_c*, т.е. скорость стружки.



а



б

Рис. 3.6. Корень сливной стружки (а) и зоны первичной и вторичной деформации при превращении срезаемого слоя в сливную стружку (б)

Многочисленными исследованиями установлено, что при резании с большими сечениями среза уширение стружки незначительно, поэтому можно считать, что деформированное состояние в зоне стружкообразования является плоским и срезаемый слой в процессе резания претерпевает деформацию сдвига. Линией *OA* показана поверхность сдвига (скольжения), на которой сдвигающие напряжения τ равны пределу текучести τ_c материала на сдвиг, т.е. $\tau = \tau_c$.

Вся зона $OABNO$ делится на подобные поверхности, на каждой из которых сдвигающие напряжения равны пределу текучести материала, уже получившего упрочнение в результате предшествующей деформации. Граница последней сдвиговой деформации обозначена на рисунке линией OB . На ней сдвигающие напряжения τ равны пределу текучести τ_c на сдвиг материала, окончательно упрочненного в результате превращения срезаемого слоя в стружку.

Деформирование срезаемого материала на этом было бы закончено, если бы отсутствовало трение между контактной поверхностью стружки и поверхностью инструмента. Поскольку трение между указанными поверхностями имеется всегда, зерна стружки, находящиеся в непосредственной близости от контактной поверхности стружки, продолжают деформироваться и после выхода их из зоны первичной деформации. Так возникает зона II вторичной деформации стружки, ограниченная передней поверхностью инструмента и линией OND . Ширина OD этой зоны приблизительно равна половине ширины площадки контакта c , а максимальная ее толщина Δ_1 составляет примерно $0,1a_c$. Степень деформации зерен во II зоне может в 20 и более раз превышать среднюю деформацию стружки [1].

Размеры зоны вторичной деформации и степень деформации зерен в этой зоне определяются силами трения на контактных поверхностях стружки и инструмента. Чем меньше силы трения, тем меньше размеры зоны II и деформация в ней зерен. При уменьшении a , увеличении γ и применении СОЖ с сильно выраженными смазочными свойствами зона II практически исчезает. В этом случае деформация зерен стружки по ее толщине остается практически одинаковой.

Зона первичных деформаций $OABNO$ различными исследователями описывалась по-разному — в виде единичной плоскости, семейства плоскостей, семейства кривых линий скольжения и т.д. Но толщина зоны первичной деформации соизмерима с толщиной срезаемого слоя только при малых значениях γ , низких скоростях резания и больших толщинах срезаемого слоя. При значениях γ , a и v , используемых в производственных условиях, протяженность FQ зоны первичной деформации резко сокращается, а ее границы OA и OB сдвигаются, приближаясь к линии OE , наклонной к плоскости резания под углом Φ . Это позволяет считать, что сдвиговые деформации локализуются в тонком слое толщиной Δx , а семейство плоскостей скольжения можно заменить единственной плоскостью OE , называемой *условной плоскостью сдвига*. При этом превра-

щение срезаемого слоя в стружку можно представить как последовательные сдвиги тонких слоев обрабатываемого материала вдоль условной плоскости сдвига. Процесс образования стружки в этом случае должен подчиняться закономерностям простого сдвига.

Схема образования сливной стружки с единственной плоскостью сдвига. Предположим, что режущий инструмент должен переместиться из положения *I* в положение *II* на расстояние Δl (рис. 3.7). При этом точка *Q* срезаемого слоя, имеющего вид параллелограмма *MNPQ*, лежащая на поверхности резания, окажется в точке *Q*₁, лежащей на передней поверхности инструмента, а точка *P* окажется в точке *P*₁, лежащей на свободной стороне стружки. Таким образом, параллелограмм *MNPQ*, сдвигаясь вдоль основания *MN* на Δs , превращается в параллелограмм *MNP*₁*Q*₁, который принадлежит не срезаемому слою толщиной *a*, а стружке. При дальнейшем перемещении инструмента на Δl указанный процесс повторяется в результате непрерывных сдвигов тонких слоев материала по условной плоскости сдвига без нарушения связей между сдвинутыми слоями, т.е. без нарушения сплошности материала стружки. Расстояние Δs есть не что иное, как абсолютный сдвиг.

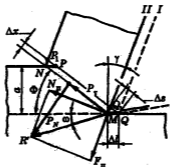


Рис. 3.7. Схема превращения срезаемого слоя в сливную стружку

Чтобы ответить на вопрос, что вызывает сдвиг срезаемого слоя вдоль условной плоскости сдвига и когда этот сдвиг начнется, рассмотрим силы, действующие на срезаемый слой со стороны передней поверхности инструмента.

На срезаемый слой инструмент действует с нормальной силой на передней поверхности N_n , которая создает силу трения $F_n = \mu N_n$ (μ — коэффициент трения между стружкой и инструментом). В сумме силы N_n и F_n дают силу стружкообразования R , наклон-

ную к поверхности резания под углом действия ω . Разложим R' на силу P_N , перпендикулярную к условной плоскости сдвига MN , и силу P_τ , действующую вдоль плоскости сдвига. Сдвигаемый слой толщиной Δx сжимается силой P_N , а сдвигающая его сила P_τ получила название *силы сдвига*. Сдвиговая деформация начнется в том случае, когда напряжение сдвига станет равным пределу текучести на сдвиг.

При прямоугольном резании сдвигающее напряжение на условной плоскости сдвига $\tau = P_\tau / (MN \cdot b)$, где b — ширина срезаемого слоя. Так как $MN = a/\sin\Phi$, то $\tau = P_\tau \sin\Phi / (ab)$. В свою очередь, $P_\tau = R' \cos(\omega + \Phi)$; тогда $\tau = R' \cos(\omega + \Phi) \sin\Phi / (ab)$.

Процесс образования стружки начнется тогда, когда напряжение сдвига τ будет больше или равно пределу текучести обрабатываемого материала на сдвиг τ_c . Установлено, что независимо от физико-механических свойств обрабатываемого материала, значений v , a и γ касательные напряжения вдоль условной плоскости сдвига остаются постоянными, а нормальные напряжения могут иметь различные значения [1].

При больших значениях γ и малых коэффициентах трения на передней поверхности инструмента нормальные напряжения уменьшаются вдоль условной плоскости сдвига по сечению стружки в сторону передней поверхности инструмента, и в некоторой точке

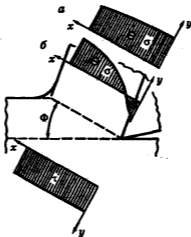


Рис. 3.8. Эпюры нормальных σ и касательных τ напряжений на плоскости сдвига при малых (а) и больших (б) передних углах

их знак может измениться на противоположный (рис. 3.8). Если уменьшать γ и увеличивать коэффициент трения, нормальные напряжения будут изменяться по сечению стружки в противоположном направлении. Хотя нормальные напряжения вдоль условной плоскости сдвига непостоянны, они не влияют на касательные напряжения.

Условной плоскостью сдвига разделяются области недеформированного материала, принадлежащего срезаемому слою, и уже полностью деформированного материала стружки. В результате пластической деформации в стружке образуется текстура в виде полос или строчек, расположенных под некоторым углом ψ к условной плоскости сдвига (рис. 3.9, а), называемым *углом текстуры*. Линии текстуры представляют собой цепочки деформированных зерен стружки, получивших после прохождения через условную плоскость сдвига определенную форму и ориентацию.

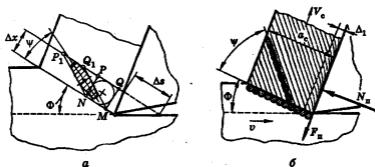


Рис. 3.9. Схемы превращения сфероида в эллипсоидальное (а) и формирования текстуры (б)

Образование текстуры можно представить следующим образом (рис. 3.9, а). Сфероидальное зерно материала впишем в куб со стороной, равной толщине сдвигаемого слоя. В сечении плоскостью, перпендикулярной к режущей кромке инструмента, будем иметь круг радиусом $\Delta x/2$. В результате деформации простого сдвига верхняя плоскость сдвигаемого слоя переместится относительно нижней на абсолютный сдвиг Δs . Квадрат $MNPQ$ превратится в параллелограмм MNP_1Q_1 , а круг — в эллипс, большая ось которого наклонена к условной плоскости сдвига под углом текстуры ψ . Значение ψ можно определить из выражения

$$\operatorname{ctg}\psi = \frac{\varepsilon + \sqrt{\varepsilon^2 + 4}}{2},$$

где ε — относительный сдвиг при превращении срезаемого слоя в стружку.

Цепочки эллипсов в направлении их больших осей (рис. 3.9, б) представляют собой линии текстуры деформации стружки.

Угол текстуры зависит от степени деформации срезаемого слоя, определяемой относительным сдвигом. Чем больше ε , тем меньше ψ , и наоборот. Превращение сфероидального зерна в эллипсоидальное является следствием первичной деформации срезаемого слоя при прохождении зерна через условную плоскость сдвига. Если бы отсутствовало трение стружки о переднюю поверхность, линии текстуры шли бы параллельно друг другу, сохраняя угол текстуры неизменным. Однако в слое стружки толщиной Δ_1 , прилегающем к ее контактной стороне, эллипсоидальные зерна, деформированные на первой стадии, теряют свою форму под действием силы трения $F_{\text{п}}$ и линии текстуры искривляются вследствие вторичной деформации срезаемого слоя.

Схема образования элементной стружки. При исследовании зоны стружкообразования установлено, что прежде чем произойдет разрушение по плоскости скалывания (рис. 3.10), в объеме будущего элемента стружки возникают значительные деформации сжатия, вызывающие течение материала срезаемого слоя вдоль и перпендикулярно к передней поверхности инструмента. Превращение срезаемого слоя в элемент стружки происходит следующим образом (рис. 3.11). При перемещении инструмента на расстояние Δl его передняя поверхность деформирует объем материала, ограниченный параллелограммом M_0MNN_0 . Когда напряжения сжатия превзойдут предел текучести деформируемого материала, начнется его перемещение по передней поверхности лезвия инструмента и точка M_0 совпадет не с точкой K , как это бывает при образовании сливной стружки, а с точкой Q . Одновременно сторона M_0N_0 параллелограмма укорачивается до QP . В результате элемент срезаемого слоя M_0MNN_0 превращается в элемент стружки $MNPQ$. Когда запас пластичности обрабатываемого материала будет исчерпан, начинается его разрушение по плоскости скалывания, и сколотый элемент перемещается вверх по передней поверхности лезвия инструмента. Чем больше степень деформации срезаемого слоя, тем больше форма элемента стружки в виде трапеции $MNPQ$ приближается к треугольной. При этом сторона MN элемента стружки получает значительно большее уширение, чем при образовании сливной стружки.

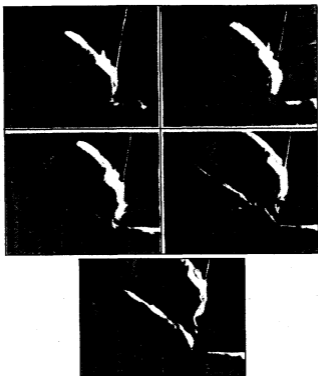


Рис. 3.10. Образование элементной стружки

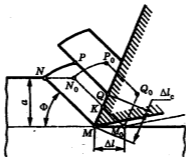


Рис. 3.11. Схема превращения срезаемого слоя в элемент стружки

Элементные стружки в общем случае различаются по форме образующихся элементов, степени деформации металла внутри элемента, повторяемости формы и размеров элементов, степени связанности элементов. Эти различия определяются свойствами обрабатываемого материала, передним углом инструмента и режимом резания (см. § 3.2). Как и при сливном стружкообразовании, существенное влияние на характеристики элементной стружки оказывает температурно-скоростной фактор, формирующий условия контактного взаимодействия образующегося элемента и передней поверхности инструмента [7]. Свойства обрабатываемого материала можно оценить по произведению $\delta \times \lambda$, где δ — относительное удлинение обрабатываемого материала при разрыве, λ — коэффициент теплопроводности. Тогда влияние температурно-скоростного фактора легко спрогнозировать по схеме, приведенной на рис. 3.12. Стрелками на этой схеме обозначены направления изменения вида образующейся стружки: от сливной к суставчатой (скальвания) с дальнейшим ослаблением связей между элементами до полного их разделения.



Рис. 3.12. Влияние температурно-скоростного фактора и свойств обрабатываемого материала на характер стружкообразования

Для обрабатываемого материала, характеризуемого некоторым средним значением $\delta \times \lambda$ (штриховая линия на рис. 3.12), повышение температуры Θ (скорости резания) вызывает сначала переход от элементной стружки к сливной, а затем — вновь к элементной. У обрабатываемых материалов с низкими значениями $\delta \times \lambda$ (серый

чугун, ряд титановых сплавов) во всем диапазоне температур (скоростей) резания образуется только элементная стружка. И наоборот, у материалов с высоким уровнем $\delta \times \lambda$ (свинец) элементная стружка не возникает ни при каких обстоятельствах.

Возможны два типа элементных стружек — низко- и высокотемпературные. Стружка первого типа (стружка скалывания) характеризуется полным деформированием всего объема элемента при нестабильности его формы и размеров. Высокотемпературная элементная стружка, наоборот, имеет стабильные форму и размеры элемента. Внутри этого элемента имеет место пластическая деформация, которая локализуется в контактном слое стружки и в местах сочленения элементов.

Отделение низкотемпературной элементной стружки начинается с возникновения трещины в окрестностях режущей кромки инструмента. Если рассматривать элемент стружки как консоль, на которую со стороны инструмента действуют распределенные нормальная и тангенциальная нагрузки (рис. 3.13), можно определить изгибающий момент:

$$M = M_N - M_F,$$

где M_N — момент, создаваемый распределенной нормальной нагрузкой; M_F — момент, создаваемый силой трения на плече $a_c/2$.

Тогда

$$M = N_n \left[k_\gamma c - \frac{a_c}{2} \operatorname{tg}(\Phi - \gamma) \right] - F_n \frac{a_c}{2},$$

где N_n — нормальная сила на передней поверхности; F_n — сила трения на передней поверхности; k_γ — относительная координата «центра давления» элемента на переднюю поверхность; c — длина контакта элемента стружки с передней поверхностью; Φ — угол скалывания (сдвига); γ — передний угол; a_c — толщина «заделки» элемента в сечении, перпендикулярном к передней поверхности.

Увеличение момента M способствует появлению в окрестностях режущей кромки положительных нормальных напряжений, тогда как сила трения F_n создает условия сжатия. Тогда вероятность возникновения трещины перед режущей кромкой можно качественно оценить выражением

$$P_\sigma = \frac{6N_n}{b_c} a_c^2 \left[k_\gamma c - \frac{a_c}{2} \operatorname{tg}(\Phi - \gamma) \right] - \frac{3F_n}{a_c b_c},$$

где b_c — ширина контакта элемента стружки с инструментом.

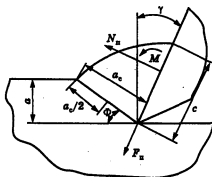


Рис. 3.13. Схема контактного взаимодействия режущего лезвия и формируемого элемента стружки скалывания

При формировании высокотемпературной элементной стружки длина ее контакта с передней поверхностью значительно превышает длину отдельного формирующегося элемента, т.е. в контакте с передней поверхностью таких элементов может быть несколько (рис. 3.14). Данное обстоятельство слабо влияет на степень воздействия моментов, но значительно увеличивает силу трения. Это способствует более высокой степени связанности и стабильности элементов при высоких скоростях резания.

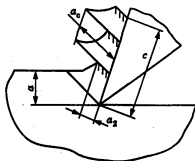


Рис. 3.14. Схема формирования суставчатой стружки

Существует мнение, что образование сливной стружки в зоне интенсивной адгезии и повышенного трения является частным случаем образования элементной стружки [7]. На это, в частности,

указывают «зубчики» на боковой поверхности сливной стружки, являющиеся результатом срачивания элементов.

Схема образования сегментированной стружки. В результате значительной скорости деформаций и достижения критического уровня тепловых деформаций теплота, образующаяся в узких зонах сдвига, практически полностью там же и остается. Это вызывает снижение границы пластичности обрабатываемого материала, и образуется сегментированная стружка (рис. 3.15).

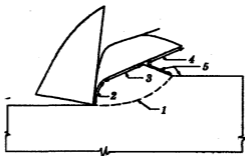


Рис. 3.15. Схема образования сегментированной стружки [12, 13]

Согласно [13], этот процесс можно разделить на два этапа. Первоначально в результате нестабильных пластических деформаций и локализации сдвигов в узких зонах внутри области первичных пластических деформаций происходит мгновенное разделение материала вдоль поверхности скольжения 1. Эта плоскость выходит из точки контакта режущей кромки с деталью параллельно вектору скорости резания и замыкается на свободной недеформированной поверхности 5. В дальнейшем происходит образование сегмента стружки с незначительной и постоянной степенью деформации материала с границей по линиям скольжения 2, 3, вдоль которых наблюдаются значительные деформации. Сформированный сегмент давит на ранее образованный и перемещает его вдоль передней поверхности; при этом между ними образуется «белый» слой материала с чрезвычайно высокими деформациями, а часть металла сегмента в результате мгновенного сдвига перемещается в направлении 4. Окончательно сформированный сегмент имеет форму зуба пилы, поэтому стружку часто называют пилообразной.

В соответствии с данными, приведенными в [12, 13], сегментированная стружка образуется:

□ при резании легированных сталей (AISI 4340) — на скорости свыше 975 м/мин;

□ для никелевого сплава Inconel 718 — на скорости свыше 100 м/мин;

□ для титанового сплава Ti6Al4V — практически во всем используемом в практике диапазоне скоростей.



Рис. 3.16. Схема стружкообразования при резании хрупких материалов

Схема образования стружки надлома. На рис. 3.16 представлена наиболее простая схема стружкообразования в случае прямоугольного резания хрупких материалов [6]. Под действием режущего лезвия резца у его передней поверхности образуются трещины, распространяющиеся в направлении вектора скорости. Причинами возникновения и развития трещин являются растягивающие или сдвигающие напряжения, которые могут быть вызваны гидростатическим напряжением, изгибающим моментом, наличием большой поверхности сдвига и другими факторами. На первом этапе стружкообразования происходит непрерывное повышение силы резания, обеспечивающее развитие ведущей равномерно-подвижной трещины 3. Оно продолжается до тех пор, пока на формирование стружки не начнет оказывать воздействие напряжение изгиба, приводящее к быстрому падению силы резания и отрыву элемента стружки вдоль поверхности 2. На втором этапе происходит зачистка поверхности резания 1, характеризующаяся отрывом более мелких частиц стружки по описанной схеме. Если развитие основной трещины идет ниже поверхности резания, второй этап отсутствует.

Кинематика сливного стружкообразования.

3.4. Завивание и дробление стружки

Рассмотрим схему сливного стружкообразования (рис. 3.17, а), на которой ось x совмещена с нижней границей пластической деформируемой зоны. Все частицы, лежащие перед этой границей, перемещаются относительно лезвия инструмента со скоростью резания v . После пересечения границы они за счет пластических сдвигов получают дополнительные смещения со скоростью v_t , которая направлена вдоль оси x . На этой оси $v_t = 0$, а на верхней границе переходной пластически деформированной зоны она достигает максимума. Таким образом, в каждый момент времени i -я частица металла имеет абсолютную скорость v_a , складывающуюся из скорости резания v и скорости пластических сдвигов v_{ti} , соответствующей той линии скольжения, на которой частица находится в данный момент. Таким образом, на оси x скорость $v_a = v$, а на верхней границе пластической зоны v_a соответствует скорости v_c движения стружки относительно передней поверхности инструмента.

Из плана скоростей для частиц, находящихся на верхней границе пластически деформируемой области (рис. 3.17, б), получим:

$$v_t = \frac{v \cos \gamma}{\cos(\Phi - \gamma)}; \quad v_c = \frac{v \sin \Phi}{\cos(\Phi - \gamma)}. \quad (3.3)$$

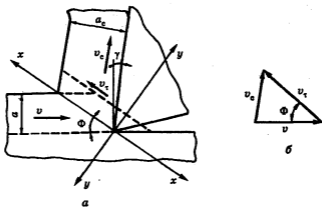


Рис. 3.17. Кинематические соотношения при сливном стружкообразовании

Скорость v , в теории резания называется *скоростью деформирования* и измеряется в метрах в секунду или минуту в отличие от скорости деформации (см. § 3.1), измеряемой в секундах в минус первой степени.

При свободном прямоугольном резании скорости v , v_1 , и v_c рассматривают в плоскости, перпендикулярной к главной режущей кромке, которая называется *плоскостью стружкообразования*. Угол между ней и главной секущей плоскостью получил название *угла схода стружки* ν . Направление схода стружки изменяется в зависимости от условий резания. Так, например, при работе главной и вспомогательной режущих кромок направление схода стружки можно считать перпендикулярным к линии, соединяющей точки входа и выхода кромок из контакта с деталью (рис. 3.18). В зависимости от элементов сечения среза и формы режущей части резца значение ν может изменяться [10]. Если передний угол резца равен нулю, то при работе острозаточенным резцом (рис. 3.18, а)

$$\nu = \frac{\pi}{2} - \varphi - \operatorname{arctg} \left(\frac{t - \frac{S}{\operatorname{ctg}\varphi + \operatorname{ctg}\varphi_1}}{\operatorname{tctg}\varphi + \frac{S \operatorname{ctg}\varphi_1}{\operatorname{ctg}\varphi + \operatorname{ctg}\varphi_1}} \right),$$

а для случая, показанного на рис. 3.18, б,

$$\nu = \frac{\pi}{2} - \varphi - \operatorname{arctg} \left(\frac{t - r_s + \frac{\sqrt{4r_s^2 + S^2}}{2}}{\operatorname{tctg}\varphi + r_s \operatorname{tg} \left(\frac{\varphi}{2} \right) + \frac{S}{2}} \right)$$

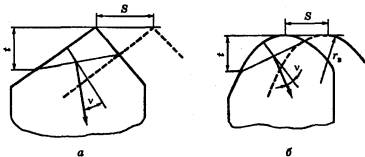


Рис. 3.18. Направления схода стружки при точении

Если передний угол реза $\gamma \neq 0$, то угол схода стружки

$$v_\gamma = \left(\frac{\pi}{2} - \varphi - v \right) \left[\cos(40t\gamma t\gamma v) \right]^k,$$

где $k = 20$ при $\gamma > 0$, $k = -20$ при $\gamma < 0$.

На направление схода стружки при косоугольном резании оказывает влияние величина угла наклона главной режущей кромки λ , на который плоскость стружкообразования отклоняется от своего исходного положения, перпендикулярного к главной режущей кромке.

В подавляющем большинстве случаев стружка имеет естественную кривизну, т.е. завивается. Происходит это потому, что сдвиг — не единственная деформация, обуславливающая превращение срезаемого слоя в стружку. Этот слой всегда с большей или меньшей интенсивностью подвергается неравномерному сжатию в направлении, перпендикулярном к передней поверхности лезвия. Как следствие, в двух других направлениях, перпендикулярных к первому, возникают напряжения растяжения, и опорная поверхность стружки приобретает большую скорость.

В настоящее время разработан ряд теорий, описывающих закономерности завивания стружки. Рассмотрим одну из них [5].

Процесс резания пластичного материала — это процесс больших его пластических деформаций в ходе преобразования в стружку. Последней стадией данного процесса является разгрузка, когда стружка теряет контакт с передней поверхностью и начинает существовать как самостоятельное тело, свободное от воздействия внешних нагрузок. Именно на этой стадии происходит ее завивание (изгиб оси).

В теории больших пластических деформаций изгиб балки (стружки) при разгрузке рассматривается как результат перераспределения (выравнивания) внутренних напряжений вследствие неоднородности напряженно-деформированного состояния материала. При этом полные напряжения σ_n рассматриваются как алгебраическая сумма фиктивных упругих σ_ϕ и пластических (остаточных $\sigma_{ост}$) напряжений:

$$\sigma_n = \sigma_\phi + \sigma_{ост}.$$

Процесс разгрузки неоднородно деформированного тела можно рассмотреть на примере разгрузки стержня при прямом прессовании (рис. 3.19, а). В результате неравномерного охлаждения силы на диаметрально противоположных сторонах матрицы оказываются

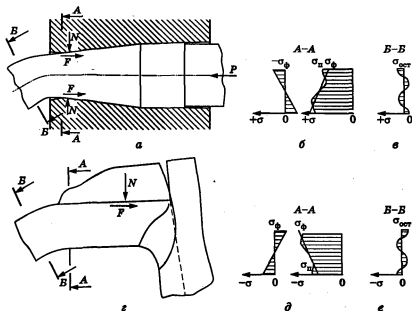


Рис. 3.19. Схема разгрузки неоднородно деформируемого тела: *а* — при прямом прессовании; *б, д* — эпюры полных напряжений σ_n ; *в, е* — эпюры остаточных напряжений $\sigma_{ост}$; *г* — при резании; σ_ϕ — напряжения, определяющие фиктивное состояние упругого равновесия в процессе пластической деформации

неоднородными: $N \neq N_1$ и $F \neq F_1$. В результате осевая симметрия неоднородности деформации будет нарушена. Предположим, что состояние истинного равновесия деформированного тела на левой границе зоны пластической деформации (сечение А-А) обеспечивается системой упругопластических напряжений σ_n , условная эпюра которых показана на рис. 3.19, б. Фиктивное состояние упругого равновесия обеспечивается моментом упругих напряжений σ_ϕ . Перераспределение напряжений при разгрузке вызовет выравнивание напряжений по сечению и появление остаточных напряжений (рис. 3.19, в), которые можно рассчитать так:

$$\sigma_{ост} = \sigma_n - \sigma_\phi.$$

Ось изделия при этом искривляется: слои с максимальными растягивающими напряжениями σ_n сжимаются, а с минимальными —

растягиваются. Поворот сечения балки при разгрузке осуществляется под действием момента напряжений σ_{ϕ} , обеспечивающего в области пластического течения фиктивное состояние упругого равновесия, а при разгрузке изменяющего свой знак на противоположный.

Аналогичным образом происходит поворот сечения (изгиб) стружки в момент ее отрыва от передней поверхности инструмента (разгрузки). Схема этого процесса приведена на рис. 3.19, *з*. Экспериментально установлено, что при резании на высоких скоростях напряжения, действующие вдоль оси стружки, являются сжимающими по всему сечению, возрастая от свободной поверхности стружки к передней поверхности лезвия (рис. 3.19, *д*). Момент упругих напряжений, обеспечивающий фиктивное состояние упругого равновесия, направлен по ходу часовой стрелки. В момент разгрузки он меняет знак и, действуя в направлении, противоположном ходу часовой стрелки, приводит к повороту сечения стружки, т.е. к изгибу ее оси. При этом напряжения в стружке выравниваются; их предполагаемая эпюра приведена на рис. 3.19, *е*.

Источники возникновения неоднородного напряженно-деформированного состояния в материале стружки и их влияние на характер изгиба стружки при разгрузке показаны на рис. 3.20.

Причина завивания стружки в плоскости передней поверхности — переменные условия деформирования по ширине срезаемого слоя. В условиях свободного резания процесс завивания определяется главным образом непостоянством скорости резания (рис. 3.21). В этом случае крутящий момент от временных внутренних напряжений будет направлен против хода часовой стрелки, изгибая стружку в направлении оси детали. Этот эффект возрастает при увеличении глубины резания и уменьшении диаметра детали.

При несвободном резании скорость слоев стружки у свободной поверхности ниже, чем в области вершины реза, поскольку толщина стружки значительно больше. Как следствие, стружка завивается по ходу часовой стрелки (от изделия). Завивание проявляется тем интенсивнее, чем выше непостоянство степени деформации стружки по ширине.

Неравномерное распределение сил трения по площадке контакта стружки с передней поверхностью лезвия и появляющийся при этом момент сил трения изгибают стружку в течение всего периода ее контакта с лезвием (рис. 3.22, *а*). Дополнительный момент сил трения появляется в случае, когда угол наклона главной режущей кромки отличен от нуля (рис. 3.22, *б*).

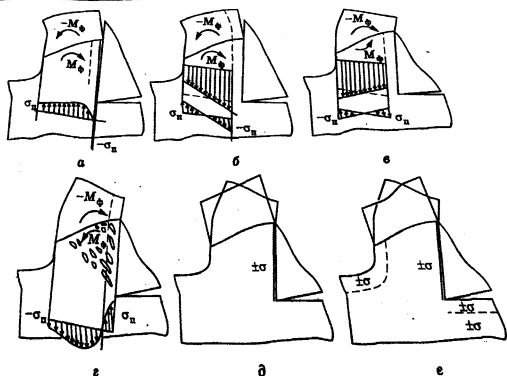


Рис. 3.20. Источники неоднородности напряженно-деформированного состояния металла стружки и характер их влияния на изгиб стружки в плоскости, перпендикулярной к режущей кромке:
 а — термопластические напряжения; б — неоднородность напряжений, связанная с непостоянством скорости деформации; в — неоднородность напряжений, связанная с различиями в температурных условиях деформации; г — неоднородность напряжений, обусловленная вторичной деформацией прирезцовых слоев стружки; д — возможное влияние фазовых превращений в прирезцовом слое; е — возможное влияние остаточных напряжений от предыдущего прохода режущего лезвия

В общем случае в процессе завивания стружки имеет место сложная деформация — косой изгиб, при котором плоскость наибольшей деформации не совпадает с плоскостью действия изгибающей силы (рис. 3.23). На представленной схеме главные оси инерции сечений стружки обозначены m и n . Момент M_n является функцией напряжений, изгибающих стружку в плоскости передней поверхности лезвия. Момент M_m является функцией напряжений, изгибающих стружку в плоскости, перпендикулярной к передней поверхности лезвия. Направление действия момента определяется углом Δ_M его наклона относительно оси m :

$$\operatorname{tg} \Delta_M = M_n / M_m.$$

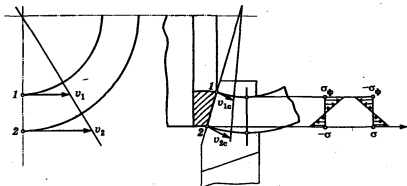


Рис. 3.21. Схема завивания стружки в плоскости передней поверхности при свободном продольном точении (v_1, v_2 — скорости резания; v_{1c}, v_{2c} — скорости стружки в точках 1 и 2)

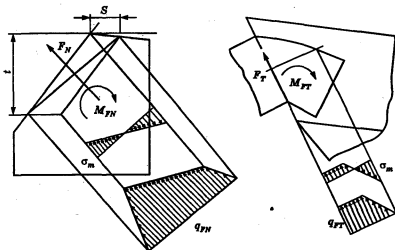


Рис. 3.22. Схемы формирования моментов сил трения, неравномерно распределенных по площадке контакта стружки с резцом:
 а — от удельных сил трения, параллельных направлению схода стружки;
 б — от удельных сил трения, направленных к вершине резца, при $\lambda \neq 0$

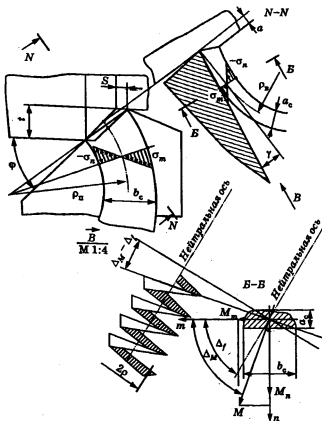


Рис. 3.23. Формирование стружки в виде винтовой спирали в результате ее косога изгиба под действием внутренних напряжений σ_m и σ_n

Примем, что ось n является осью с наибольшим моментом инерции ($I_n > I_m$); тогда плоскость оси m будет плоскостью наибольшей жесткости.

Суммарная изгибающая сила P перпендикулярна к вектору момента M и составляет угол Δ_M с осью n .

Положение нейтральной оси определяется углом ее наклона относительно оси m :

$$\operatorname{tg} \Delta_f = \frac{I_m}{I_n} \operatorname{tg} \Delta_M.$$

Если известны наибольшие значения напряжений σ_m и σ_n , изгибающих стружку в плоскости передней поверхности и в плоскости, перпендикулярной к ней, и главные моменты инерции стружки $I_m = b_c a_c^3 / 12$ и $I_n = a_c b_c^3 / 12$, можно найти:

$$\operatorname{tg} \Delta_M = \frac{M_n}{M_m} = \frac{\sigma_m b_c^2}{\sigma_n a_c^2}; \quad \operatorname{tg} \Delta_f = \frac{\sigma_m}{\sigma_n},$$

где b_c , a_c — соответственно ширина и толщина стружки.

Угол Δ_f определяет положение не только нейтральной оси, но и оси спирали сходящей стружки. Угол $\Delta = \Delta_M - \Delta_f$ является углом подъема формирующейся спирали стружки и определяется так:

$$\Delta = \operatorname{arctg} \frac{\sigma_m b_c^2}{\sigma_n a_c^2} - \operatorname{arctg} \frac{\sigma_m}{\sigma_n}.$$

Радиус спирали стружки

$$\rho = E' I / M,$$

где E' — жесткость стружки около основания (в «корне»); I — момент инерции сечения стружки относительно нейтральной оси:

$$I = \sqrt{I_m^2 \cos^2 \Delta_f + I_n^2 \sin^2 \Delta_f}.$$

После ряда преобразований [4] можно получить $\rho = (1 \dots 3)b$, где b — ширина срезаемого слоя.

Шаг спирали стружки $P_c = 2\pi \rho \operatorname{tg} \Delta$.

Легко заметить, что все параметры формы стружки определяют только двумя переменными — σ_m / σ_n и b_c / a_c . Расчеты показывают, что в процессе естественного образования (без использования стружкозавивающих канавок, порожков и т.п.) встречаются только пять типов стружки (рис. 3.24):

- 1) прямая стружка формируется при $\sigma_m = 0$ и $\sigma_n = 0$;
- 2) плоская спираль — при $\sigma_m = 0$ и $\sigma_n > 0$;
- 3) цилиндрическая спираль — при $\Delta_f = 0 \dots 5^\circ$ и $\sigma_m / \sigma_n < 5$;
- 4) винтовая спираль (переходная от цилиндрической спирали к плоской винтовой) — при $5 < \sigma_m / \sigma_n < 20$;
- 5) плоская винтовая спираль — при $\Delta_f = 85 \dots 90^\circ$ и $\sigma_m / \sigma_n > 20$.

При использовании элементов, изменяющих форму стружки, количество типов форм значительно расширяется (см. § 3.2).

Форма стружки и размеры ее элементов имеют важное значение, особенно при автоматизированном производстве. В неблагоприятных условиях возможно наматывание стружки на вращающиеся части станка, деталь или инструмент, что приводит к их

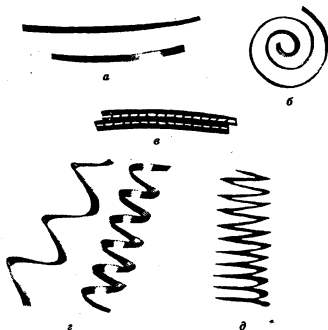


Рис. 3.24. Типы стружек:
 а — прямая; б — плоская спираль; в — цилиндрическая спираль;
 г — винтовая спираль; д — плоская винтовая спираль

поломкам. При обработке отверстий осевыми инструментами в вязких материалах, когда коэффициенты линейного укорочения и утолщения стружки велики, стружка пакетируется в канавках инструмента и контактирует со стенками обрабатываемого отверстия, что ухудшает их шероховатость или вызывает заклинивание и поломку инструмента. В связи с этим часто возникает необходимость принудительного дробления стружки, что достигается с помощью накладных стружколомов, лунок или уступов на передней поверхности лезвия, изменением кинематики резания. Дробить стружку можно также за счет подбора геометрии инструмента и определенных режимов резания. На станках с ЧПУ дробление стружки осуществляется управляющей программой (см. гл. 12).

Уступы и лунки на передней поверхности инструментов, а также накладные стружколомы (рис. 3.25) обеспечивают надежное

дробление стружки только в данных конкретных условиях обработки, в то время как при незначительном изменении условий резания либо обрабатываемого материала вновь может образовываться недробленая сливная стружка.

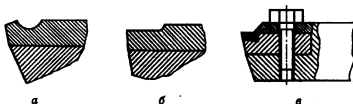


Рис. 3.25. Способы стружкодробления:

а — с помощью лунки; *б* — уступа; *в* — накладного стружколома на передней поверхности лезвия

Периодическое прерывание процесса резания с помощью изменения движения режущего инструмента в направлении подачи обеспечивает кинематическое дробление стружки при резании. Способы кинематического дробления стружки подразделяются на дискретный, вибрационный и релаксационный.

Дискретный способ дробления стружки заключается в периодическом выключении подачи на время, достаточное для прерывания процесса резания. При вибрационном способе перемещение инструмента в направлении подачи является суммой равномерного поступательного и колебательного движений. При этом элемент стружки образуется за один период колебаний инструмента.

Для осуществления вибрационного и дискретного способов дробления стружки требуются устройства сложной конструкции. К тому же недостатком дискретного дробления стружки является необходимость приводить в колебательное движение узлы значительной массы, например суппорт. Поэтому указанный способ рекомендуется при обработке заготовок, диаметр которых не превышает 200 мм. Кроме того, для обеспечения в этом случае той же производительности, что и при обычной обработке, необходимо устанавливать увеличенную подачу, которая определяется из условия равенства площадей, обработанных за равное время при одних и тех же частотах вращения шпинделя.

При релаксационном способе дробления стружки инструмент получает результирующее движение в направлении подачи, состоящее из равномерного прямолинейного движения и относительного

движения, подчиняющегося закону релаксационных колебаний. Релаксационные колебания резко отличаются по форме от гармонических. Устройства, осуществляющие указанный способ, приводятся в действие силами резания.

К кинематическим способам дробления стружки можно отнести также нанесение канавок, рисок на обрабатываемую поверхность или поверхность резания до или во время обработки.

Перечисленные выше способы дробления стружки сопровождаются вибрациями инструмента и детали, снижающими качество обработанной поверхности; поэтому наиболее перспективными, особенно при обработке нежестких деталей, можно считать способы безвибрационного дробления путем нанесения на поверхность резания непрерывной синусоидальной канавки, нагрева стружки электрическим током до расплавления, пережиганием сходящей стружки импульсами электрического тока с помощью электродов, а также способ дробления с использованием теплоты дуги сварочной горелки с неплавящимся электродом.

Так, устройство для термического дробления обеспечивает пережигание сходящей стружки с использованием электрического разряда. Схема, поясняющая принцип его работы, представлена на рис. 3.26. На резце 3 устанавливают электрод 1, изолированный от резца диэлектрической прослойкой 2, и подключают к электрической цепи.

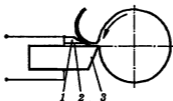


Рис. 3.26. Устройство для дробления стружки с использованием электрического разряда

В процессе резания сходящая стружка постоянно контактирует с электродом. Периодическое включение электрической цепи вызывает электрические разряды в местах контакта, а следовательно, и пережигание стружки. Такие способы не оказывают отрицательного влияния на период стойкости инструмента и качество обработанной поверхности, обеспечивая более плавный сход стружки, отсутствие вибраций, а также уменьшение составляющих сил резания.

Одним из показателей стабильности процесса резания является *степень дробления стружки*, которая выражается через объемный коэффициент K_V , представляющий собой отношение объема материала срезаемого слоя V к объему полученной стружки V_c , т.е. $K_V = V/V_c$. Значение K_V определяют путем измерения с помощью мерного сосуда объема стружки V_c и ее массы m_c . Объем снятого металла $V = m_c / \rho$, где ρ — плотность металла.

Можно принять, что условия обработки неблагоприятны, если $K_V < 5\%$, средние, если $5 < K_V < 20\%$, и хорошие, если $20 < K_V < 35\%$. Условия обработки вновь ухудшаются при $K_V > 35\%$, поскольку в этом случае стружка очень мелкая, пылеобразная, что затрудняет ее транспортирование и размещение в стружечных канавках.

Особенности пластического

3.5. деформирования металла при резании

Сопrotивление металлов пластическому деформированию определяется не только их химическим составом и структурой, но и условиями деформирования. Это, в частности, напряженное состояние в зоне деформации, скорости деформирования и деформации, температурный режим в зоне деформации [2].

При растяжении металлы проявляют относительно невысокую пластичность, т.е. разрушаются, достигнув небольшой степени деформации. Однако при резании пластичность металла значительно возрастает, поскольку в переходной пластически деформируемой зоне элементарные объемы срезаемого слоя находятся в условиях гидростатического давления (равномерного всестороннего сжатия) и одновременно — под действием системы касательных напряжений (рис. 3.27). Кроме того, увеличению пластичности способствует нагрев деформируемого объема металла при резании.

Ранее (см. § 3.4) отмечалось, что для резания характерны высокие скорости деформации. Рассмотрим их влияние на τ_c . В результате исследований установлены три характерные области изменения $u_{\text{деф}}$, в каждой из которых она по-своему влияет на сопротивление металла деформированию.

Первая область характеризуется участием в процессе деформирования явления рекристаллизации, т.е. полного изменения кри-

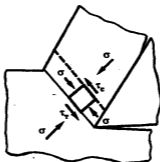


Рис. 3.27. Напряженное состояние в переходной пластически деформируемой зоне

сталлической структуры, полученной после деформирования. Это возможно, когда температура в зоне резания близка к температуре рекристаллизации, а скорость деформации относительно невелика. В этой области при увеличении скорости растет сопротивление деформированию, так как разупрочняющие процессы происходят все в меньшей степени.

Во второй области рекристаллизации не наблюдается, влияние скорости связано только с явлением отдыха — полного или частичного снятия последствий пластического деформирования без изменения кристаллической структуры. Такие условия бывают либо при значительно более низких температурах, чем температура рекристаллизации, либо при гораздо более высоких скоростях деформирования, когда рекристаллизация не успевает произойти.

В обеих областях процесс деформирования близок к изотермическому, так как теплота, выделяющаяся в зоне деформации, за время деформирования практически полностью отводится из этой зоны в сопряженные области металла и не вызывает нагрева деформируемых слоев.

В третьей области при значительном увеличении скорости деформации возникают явления адиабатического разогрева деформируемых слоев металла теплотой, выделяющейся при деформации, поскольку теплота не успевает отводиться из зоны деформации. В этом случае (при $v_{\text{деф}} > 10^4 \dots 10^5 \text{ с}^{-1}$) сопротивление деформации уменьшается с увеличением скорости. Такой процесс характерен для сливного стружкообразования, при котором процесс деформи-

рования локализуется в очень узкой, не превышающей сотых долей миллиметра, зоне, а температура достаточно высока. Необходимо отметить, что на условия перехода от изотермического процесса деформирования к адиабатическому наряду со скоростью влияют также тепло- и теплопроводность деформируемого металла (чем они ниже, тем при более низких скоростях проявляется влияние разогрева деформируемых слоев).

При дальнейшем увеличении скорости резания наблюдается явление резкого падения порога пластичности, связанного с мгновенным разрушением дислокационных структур, имеющих в обрабатываемом материале, и преобразованием энергии разрушения в тепловую. На рис. 3.28 показан характер зависимости степени упрочнения обрабатываемого материала (кривая 1) и количества дефектов, возникающих в зоне деформаций (кривая 2), от скорости резания. На кривой упрочнения можно выделить области I и IV с постоянной степенью упрочнения материала, область II, в которой упрочнение снижается, и область III, в которой оно несколько возрастает. Область I соответствует традиционному диапазону скоростей резания, область IV — сверхскоростному резанию. В этой зоне скоростей количество дефектов, образующихся в материале в процессе резания, на несколько порядков выше, что приводит к его охрупчиванию и облегчает выполнение следующего прохода режущего лезвия.

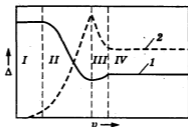


Рис. 3.28. Влияние скорости резания на степень упрочнения обрабатываемого материала [15]

Склонность материала к охрупчиванию зависит от его теплофизических характеристик и скорости деформации [14]. Так, для титановых сплавов адиабатический процесс резания возможен уже при 0,3 м/мин, для углеродистых сталей адиабатическое разупрочнение проявляется при скоростях свыше 400 м/мин.

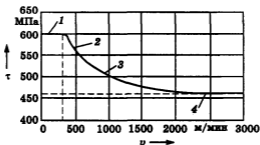


Рис. 3.29. Влияние скорости резания на средние напряжения в зоне сдвига при резании углеродистой стали [14]:

- 1 — зона однородной деформации; 2 — узкая область первичных пластических деформаций; 3 — зона мгновенных сдвигов; 4 — широкая область первичных пластических деформаций

Характер изменения уровня напряжений сдвига в зависимости от скорости резания показан на рис. 3.29.

3.6. Деформация стружки

При резании металлов пластическая деформация внешне проявляется в том, что толщина стружки a_c становится больше толщины среза a (рис. 3.30), а ее ширина больше ширины срезаемого слоя, т.е. $b_c > b$. Но так как объем стружки остается прежним, оказывается, что длина стружки l_c обычно становится короче пути l , пройденного инструментом.

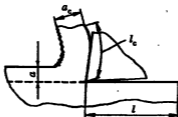


Рис. 3.30. Схема определения коэффициента укорочения сплошной стружки

Указанное изменение размеров срезаемого слоя называется *усадкой стружки* и характеризуется коэффициентами

$$K_l = \frac{l}{l_c}; K_a = \frac{a_c}{a}; K_b = \frac{b_c}{b},$$

где K_l , K_a , K_b — коэффициенты соответственно *укорочения*, *утолщения* и *уширения стружки*. Эти коэффициенты, как правило, больше единицы и являются косвенными показателями интенсивности пластической деформации при резании металлов. Они показывают, во сколько раз размеры стружки по длине, толщине и ширине меньше или больше соответствующих размеров срезаемого слоя. Так как объем стружки равен объему срезаемого слоя, то $lab = l_c a_c b_c$, поэтому $K_l = K_a K_b$.

Обычно уширение стружки даже при свободном резании невелико и составляет 5...15 % от ширины срезаемого слоя, в то время как укорочение и утолщение стружки оцениваются в 250...600 % и более. Поэтому при черновой обработке уширением стружки можно пренебречь и считать, что $K_l \approx K_a$. При резании же с малыми сечениями среза K_b достаточно велик и достигает 1,5 и более [11]. В этих случаях даже поперечное сечение стружки не соответствует сечению среза, а приобретает форму треугольника. Поэтому при исследовании чистовых процессов отдельно рассматривают K_l , K_a и K_b .

Иногда на стружке наблюдаются значительные выступы и впадины, т.е. она имеет сегментированную форму (рис. 3.31). В этом случае для расчетов можно пользоваться формулой [9]

$$K_l = K_a K_b e_0,$$

где $K_a = a_c/a$ — коэффициент утолщения; $K_b = b_c/b$ — коэффициент уширения; e_0 — коэффициент сплошности стружки: $e_0 = (a_1 + a_2)/(2a_1)$; для непрерывной сливной стружки $e_0 = 1$, для элементной $e_0 < 1$.

На основании экспериментальных данных установлено, что для $\gamma = 0...10^\circ$ и $\Phi > 36...40^\circ$ $K_l < 1$, что характерно для сверхскоростной обработки и резания титановых сплавов (см. § 3.3). В данном случае длина стружки за счет пустот на стороне, противоположной прирезочной зоне, становится больше длины срезаемого слоя, а K_l будет меньше единицы (0,75...0,9). Такое явление называют отрицательной усадкой.

Коэффициент K_l легко определить расчетным путем по формуле (3.2). Анализируя формулу (3.3), можно заметить, что скорость перемещения стружки относительно передней поверхности лезвия в K_l раз меньше скорости резания, т.е. $v_c = v / K_l$.

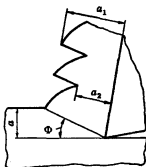


Рис. 3.31. Схема определения коэффициента укорочения сегментированной стружки

Коэффициенты укорочения, утолщения, уширения стружки можно определить также экспериментальным путем [8, 11].

Рассмотрим факторы, влияющие на коэффициент укорочения стружки:

1) изменение переднего угла лезвия γ : при его увеличении коэффициент укорочения стружки уменьшается (рис. 3.32, а). Это подтверждается рядом исследований, которые показывают, что при увеличении переднего угла лезвия уменьшается трение стружки о переднюю поверхность инструмента, что, в свою очередь, приводит к увеличению угла сдвига Φ (рис. 3.32, б, в). Известно, что чем больше угол Φ , тем меньше коэффициент укорочения стружки;

2) применение СОЖ: снижение коэффициента трения приводит к уменьшению усадки стружки;

3) изменение толщины среза: чем больше толщина срезаемого слоя металла, тем меньше коэффициент укорочения стружки, что также связано с изменением угла Φ . Например, при $a = 0,13$ мм $\Phi = 26^\circ$, при $a = 2,65$ мм $\Phi = 36^\circ$;

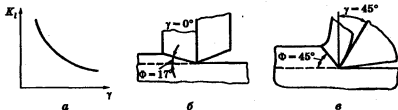


Рис. 3.32. Влияние переднего угла на утолщение стружки и изменение угла сдвига

4) изменение скорости резания: с ее увеличением происходит немонотонное изменение укорочения стружки. Зависимость $K_I = f(v)$ с различными углами γ при обработке стали 40 представлена на рис. 3.33. Характер изменения K_I при различных скоростях резания объясняется изменением размеров нароста (см. гл. 4). Минимальный коэффициент укорочения стружки соответствует наибольшему размеру нароста. Характерные точки, соответствующие максимальному значению коэффициента укорочения на кривых $K_I = f(v)$, или точки перегиба, тем больше сдвигаются в область низких скоростей резания, чем пластичнее обрабатываемый материал и меньше передний угол и толщина среза.

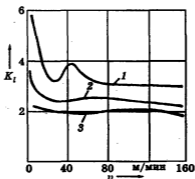


Рис. 3.33. Зависимость $K_I = f(v)$ с различными значениями угла γ при обработке стали 40:
1 - $\gamma = 0^\circ$; 2 - $\gamma = 15^\circ$; 3 - $\gamma = 30^\circ$

Вид кривых на рис. 3.33 объясняется тем, что при малых скоростях резания нарост не образуется и передний угол γ мал, т.е. коэффициент укорочения стружки K_I велик.

С достижением скорости резания примерно 50 м/мин, когда нарост максимален, увеличивается действительный передний угол γ_d и, следовательно, снижается K_I . При скоростях резания 80...100 м/мин нарост исчезает, поэтому K_I становится максимальным. При дальнейшем увеличении v (более 100 м/мин) в прирезцовой зоне под действием высокой температуры граничный слой металла сильно размягчается и выполняет роль твердого смазочного вещества. В этих условиях коэффициент трения на передней поверхности инструмента сильно снижается, что сопровождается уменьшением коэффициента укорочения стружки.

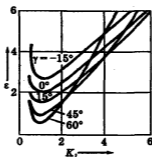


Рис. 3.34. Зависимость относительного сдвига и коэффициента укорочения стружки от переднего угла

Коэффициент укорочения стружки является только приближенной характеристикой степени деформации обрабатываемого материала. Более точно ее характеризует относительный сдвиг [8]. При различных передних углах одному и тому же значению K_l соответствуют различные значения ϵ (рис. 3.34). Если для оценки степени деформации срезаемого слоя пользоваться значением K_l , то для случая $K_l = 1$ можно сделать вывод об отсутствии деформации при резании. На самом деле это не так, и даже при $K_l = 1$ относительный сдвиг не равен нулю. Таким образом, значение K_l может служить только внешним, качественным показателем тех деформационных процессов, которые происходят в срезаемом слое.

Литература

1. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. М.: Машиностроение, 1975.
2. Клушин М.И. Резание металлов: В 3 ч. / М.И. Клушин. Горький: ГПИ, 1965. Ч. I.
3. Коженкова Т.И. Лабораторные работы по резанию металлов / Т.И. Коженкова, Е.Э. Фельдштейн. Мн.: Выш.шк., 1985.
4. Куфарев Г.Л. Зависимость радиуса завивания стружки в плоскости передней грани от параметров процесса резания / Г.Л. Куфарев // Прогрессивные технологические процессы в машиностроении: Сб. науч. тр. Томск: Изд-во ТПУ, 1997. С. 41–44.
5. Куфарев Г.Л. Причины и механизм формирования стружки пластичных металлов в спирали различных типов / Г.Л. Куфарев // Прогрес-

сивные технологические процессы в машиностроении: Сб. науч. тр. Томск: Изд-во ТПУ, 1997. С. 34-40.

6. *Подураев В.Н.* Резание труднообрабатываемых материалов / В.Н. Подураев. М.: Машиностроение, 1974.

7. *Полетика М.Ф.* Контактные условия как управляющий фактор при элементном стружкообразовании / М.Ф. Полетика // Прогрессивные технологические процессы в машиностроении: Сб. науч. тр. Томск: Изд-во ТПУ, 1997. С. 6-13.

8. Развитие науки о резании металлов / В.Ф. Бобров [и др.]; Под ред. Н.Н. Зорева. М.: Машиностроение, 1967.

9. *Резников Н.И.* Физические особенности процесса резания и обрабатываемость жаропрочных и титановых сплавов / Н.И. Резников, А.С. Черемсин // Исслед. обрабатываемости жаропрочных и титановых сплавов. Куйбышев, 1973. С. 5-17.

10. *Силин С.С.* Определение угла схода стружки при точении / С.С. Силин, В.А. Козлов // Производительная обработка и технологическая надежность деталей машин. Ярославль: Яросл. политех. ин-т, 1978. С. 3-18.

11. *Фельдштейн Е.Э.* Финишная механическая обработка деталей из порошковых материалов / Е.Э. Фельдштейн, В.А. Николаев. М.: Выш. шк., 1987.

12. *Komanduri R.* On the mechanics of chip segmentation in machining / R. Komanduri, R.H. Brown // Trans. ASME, J. Eng. for Industry. 1981. V. 103. Ser. B. P. 33-51.

13. *Komanduri R.* Some clarifications on the mechanics of chip formation when machining titanium alloys / R. Komanduri // Wear. 1982. V. 76. P. 15-34.

14. *Recht R.F.* Catastrophic thermoplastic shear / R.F. Recht. Trans. ASME, J. Appl. Mech. 1964. V. 31. P. 189-193.

15. *Schulz H.* Aspects in Cutting Mechanism in High Speed Cutting / H. Schulz, G. Spur // Annals of CIRP. 1989. V. 38. № 1. P. 51-54.

4

ТРЕНИЕ И КОНТАКТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ

Контактные явления в процессе

4.1. стружкообразования

Ранее (см. гл. 3) отмечались высокие скорости деформации, присущие процессу резания. Они фактически соответствуют скоростям, имеющим место при обработке взрывом. В этих условиях резко меняются физико-механические свойства материала: возрастает число возможных плоскостей скольжения, изменяется соотношение его предела текучести и временного сопротивления, возрастает химическая активность материала и т.д.

Экспериментальные данные показывают, что только за счет образования новой поверхности в пределах площадки контакта стружки с передней поверхностью лезвия в секунду возникает около 10^{15} свободных связей. И хотя продолжительность их существования составляет 10^{-12} с, на передней поверхности лезвия успевает образоваться так называемый *граничный слой*. Этот чрезвычайно тонкий слой возникает благодаря мгновенному процессу схватывания двух разнородных материалов и сопровождающих его явлений адгезии и диффузии. В условиях действия внешней среды к этим явлениям присоединяются также адсорбция (поглощение вещества из газовой или жидкой среды поверхностным слоем твердого тела) и химические реакции вновь возникающих при резании поверхностей с внешней средой. В связи с тем что поверхности лезвия и стружки не идеально гладкие, а имеют микро- и субмикронеровности, трещины, они контактируют не по плоскости, а только в локальных точках фактического контакта. Эти точки являются активными центрами взаимодействия инструментального и обрабатываемого материалов с наиболее высокой свободной энергией, и именно здесь начинается образование граничного слоя.

Граничный слой, в свою очередь, состоит из нескольких слоев — переходного между поверхностями инструмента и обрабатываемого материала и последующих. В пределах переходного слоя наблюдается большое количество пор, образовавшихся между выступающими

зернами инструментального материала и внутри сильно деформированного обрабатываемого металла. Граничный слой формируется в результате действия явления переноса — перенесения одного материала на поверхность другого в результате их твердофазного взаимодействия. Перенос — явление чрезвычайно сложное и проявляется на макро- (налипы, обволакивание, намазывание), микро- и субмикроскопическом уровнях. Для него характерны: неоднородность рельефа контактной поверхности вследствие различных скоростей схватывания и разрушения пары инструментальный материал — обрабатываемый материал на различных участках контакта; фазовые превращения, обусловленные взаимодействием данной пары материалов друг с другом и с внешней средой; наличие текстур; образование различных микро- и субмикроструктур и др. Из-за сложности строения и названных свойств граничный слой в отличие от обрабатываемого и инструментального материалов значительно хуже травится, поэтому и получил название «белый слой».

Граничный слой служит своего рода основой, влияющей на другие контактные процессы. Например, он может сохранять свою малую толщину или служить первоосновой для образования наростов значительной высоты, защищать площадки контакта от изнашивания или, наоборот, способствовать ему, изменять условия трения и т.д.

4.2. Трение на контактных площадках

Основные особенности трения при резании — различное физико-механическое состояние контактирующих поверхностей; интенсивное схватывание обрабатываемого и инструментального материалов; сложный характер распределения нормальных напряжений на контактных площадках; малая продолжительность контакта инструмента со стружкой и деталью при постоянном обновлении зоны контакта и др.

Площадка трения на передней поверхности инструмента шириной S (рис. 4.1) состоит из участков пластического контакта шириной S_n и упругого. На участке S_n стружка движется по заторможенному слою, и сопротивление, оказываемое движению стружки, определяется сопротивлением сдвигу в контактном слое стружки. При этом внешнее трение скольжения отсутствует и заменяется внутренним трением между отдельными слоями стружки. На участке за пределами S_n внешнее трение скольжения и сопротивление

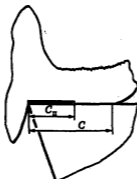


Рис. 4.1. Зоны трения на передней поверхности инструмента

движению стружки определяются силой трения между стружкой и передней поверхностью инструмента. Ширина площадки контакта зависит от переднего угла γ , толщины срезаемого слоя, коэффициента утолщения стружки K_a , скорости резания и других факторов (рис. 4.2). Для ее определения используется формула [1]

$$C = aK_a^{0,1}[K_a(1 - \operatorname{tg}\gamma) + \sec\gamma],$$

из которой видно, что C растет при увеличении K_a и a и уменьшается при увеличении переднего угла γ . При увеличении угла наклона главной режущей кромки λ ширина пластического контакта также уменьшается. Отношение C_n/C при обработке обычных конструкционных материалов чаще всего составляет 0,5 и не превышает 0,7 [2, 4].

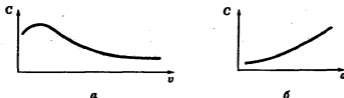


Рис. 4.2. Зависимость ширины площадки контакта от скорости резания (а) и толщины среза (б)

Сложный характер контакта на передней поверхности сказывается на распределении контактных напряжений. В настоящее время известно три случая такого распределения (рис. 4.3). Если считать,

что нормальные напряжения изменяются по закону треугольника, расчет ширины площадки контакта можно производить по формуле [6]

$$C = \frac{2a \cos \theta}{\operatorname{tg}(\Phi + \theta - \gamma) \sin \Phi \cos(\Phi - \gamma)},$$

где θ — угол трения на передней поверхности инструмента.

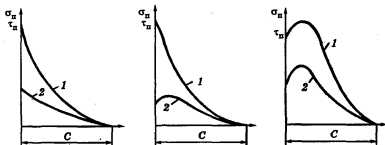


Рис. 4.3. Характер распределения нормальных σ_n (кривая 1) и касательных τ_n (кривая 2) напряжений вдоль площадки контакта стружки с передней поверхностью

Таким образом, C уменьшается с возрастанием углов сдвига и трения.

Длина площадки контакта лезвия с поверхностью резания без учета вспомогательной кромки

$$b = \frac{t - 2r_n \sin^2(\varphi/4)}{\sin \varphi} + \frac{\pi r_n \varphi}{180},$$

где t — глубина резания; r_n — радиус вершины; φ — главный угол в плане.

Среднюю нормальную силу N_n и силу трения F_n можно определить, суммируя в пределах площадки контакта нормальные и касательные напряжения (рис. 4.4). При свободном резании инструментом с $\lambda = 0^\circ$ силы F_n и N_n можно определить, измерив предварительно с помощью динамометра силы P_x и P_y , действующие на срезаемый слой. Отметим, что сила P_x совпадает с вектором скорости резания, а P_y перпендикулярна к ней.

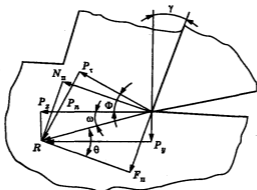


Рис. 4.4. Схема сил, действующих на передней поверхности инструмента

Равнодействующая сил P_z и P_y наклонена к направлению плоскости резания под *углом действия* $\omega = \text{arctg}(P_z/P_y)$. Тогда

$$N_n = \frac{P_z \cos(\omega + \gamma)}{\cos \omega}; \quad F_n = \frac{P_z \sin(\omega + \gamma)}{\cos \omega}.$$

По закону Амонтона — Кулона средний коэффициент трения равен отношению F_n к N_n . Тогда

$$\mu = F_n/N_n = \text{tg}(\omega + \gamma).$$

Таким образом, угол трения θ на передней поверхности лезвия зависит от угла γ и угла действия ω , т.е. $\theta = \omega + \gamma$. С увеличением среднего коэффициента трения (угла трения) при неизменном переднем угле угол действия растет и увеличивается его влияние на деформационные процессы в срезаемом слое. В частности, зависимость между углами Φ , θ , ω и γ можно описать с помощью формулы К.А. Зворыкина

$$2\Phi + \theta - \gamma = 2\omega + \omega = c,$$

где c — постоянная величина, близкая к 80° . Можно использовать также некоторые другие соотношения [7].

Увеличение средних нормальных контактных напряжений приводит к снижению μ , и наоборот (рис. 4.5). Значение μ при резании достигает 1,2...3. Это позволяет дать физическое объяснение возникновению зоны вторичной деформации стружки (см. гл. 3). Сила схватывания между опорной поверхностью стружки и лезвием во

многих случаях превышает силу сопротивления движению стружки в слое, лежащем в ее толще. Граничные слои затормаживаются, а основной объем перемещается в продольном направлении за счет внутренних сдвигов. Эти сдвиги являются вторичной пластической деформацией стружки и сопровождаются дальнейшим упрочнением деформируемых слоев, начиная со слоя, ближайшего к опорной поверхности стружки. При достижении в каждом слое стружки силы сопротивления сдвиговым деформациям, равной силе схватывания опорной поверхности стружки с инструментом, вся стружка в целом будет перемещаться относительно передней поверхности инструмента [5].

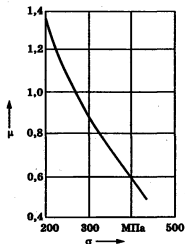


Рис. 4.5. Влияние среднего нормального напряжения на средний коэффициент трения

На коэффициент трения влияют физико-механические и теплофизические свойства обрабатываемого материала, передний угол γ , толщина среза a , скорость резания v и применяемая СОЖ.

Для трущейся пары стружка — передняя поверхность инструмента средний коэффициент трения обуславливается склонностью к адгезионному взаимодействию инструментального и обрабатываемого материалов. Возникновение связей между стружкой и инструментом определяется их способностью образовывать между собой химические соединения и твердые растворы. Чем сильнее эти связи, возникающие в результате действия сил адгезии между

стружкой и инструментом, тем больше средний коэффициент трения. С повышением механических свойств обрабатываемого материала средний коэффициент трения уменьшается, однако при этом возрастают средние нормальные и касательные напряжения. Если температура резания изменяется мало, средний коэффициент трения остается практически неизменным.

На контактных поверхностях инструмент — стружка под действием кислорода воздуха образуются оксидные пленки, препятствующие схватыванию материалов и уменьшающие средний коэффициент трения. Самый большой средний коэффициент трения отмечается у быстрорежущих сталей, далее (в порядке его уменьшения) следуют однокарбидные и двухкарбидные твердые сплавы.

Большое влияние на средний коэффициент трения оказывает СОЖ, особенно с хорошим смазочным действием. В случае применения таких СОЖ значения γ и a практически не влияют на средний коэффициент трения. Если же резание ведется без СОЖ, то при увеличении переднего угла и толщины срезаемого слоя уменьшается средний коэффициент трения, так как увеличивается среднее нормальное контактное напряжение $\bar{\sigma}_n$ на передней поверхности инструмента.

При использовании СОЖ наблюдаются два вида контакта стружки с передней поверхностью инструмента. Если СОЖ создает на поверхности контакта слой жидкости, препятствующий появлению заторможенного слоя, то на поверхности контакта наблюдается внешнее кинетическое трение, подчиняющееся закону трения Амонтона — Кулона. При внешнем трении средние касательные напряжения пропорциональны нормальным напряжениям: $\bar{\tau}_n = K \bar{\sigma}_n$, поэтому μ не зависит от $\bar{\sigma}_n$ и является константой для трущейся пары. Именно поэтому значения μ в данном случае не зависят от величины переднего угла и толщины срезаемого слоя [3].

Если на всей площадке контакта стружка — передняя поверхность инструмента образуется заторможенный слой, то внешнее трение отсутствует и средний коэффициент трения будет характеризовать пластические деформации, происходящие в контактном слое стружки. Сопротивление движению стружки в этом случае определяется касательными напряжениями в заторможенном слое, равными или пропорциональными пределу текучести материала стружки на сдвиг. Если на участке пластического контакта касательные напряжения изменяются незначительно, средний коэффициент трения $\mu = B/\bar{\sigma}_n$ ($B = \text{const}$). Отсюда видно, что с увеличением средних нормальных контактных напряжений значение μ уменьшается.

При резании обычно наблюдается смешанный контакт — упруго-пластический. При этом закономерности изменения $\bar{\sigma}_n$ и μ сохраняются, но $\bar{\sigma}_n$ влияет на μ более сильно в случае только пластического контакта.

Рассматривая влияние различных факторов на средний коэффициент трения при резании, необходимо помнить, что он ни по величине, ни по физическому смыслу, ни по закономерностям изменения не совпадает с коэффициентом внешнего трения, определяемым по закону трения Амонтона — Кулона, и не является константой трущихся пар. Такое специфическое изменение коэффициента трения при резании связано с двойкой природой трения на передней поверхности, где существуют два участка трения (зона пластического и зона упругого контакта). Поэтому средний коэффициент трения нельзя отождествлять ни с коэффициентом трения при пластическом течении материала, ни с коэффициентом внешнего трения.

Трение при резании правильнее описывать зависимостью [3]

$$F = \mu_0 N + F_a,$$

где $\mu_0 N = F_a$ — составляющая силы трения, обусловленная действиями сил адгезии между трущимися поверхностями и зависящая от условий резания; μ_0 — «истинный» коэффициент трения, зависящий от «атомно-молекулярной шероховатости» поверхности (коэффициент трения скольжения); N — нормальная сила.

Средний коэффициент трения при резании равен отношению средней силы трения к средней нормальной силе, т.е. $\mu = \mu_0 + (F_a/N)$.

Так как $F_a = \bar{\tau}_n Cl$ и $N = \bar{\sigma}_n Cl$, то $\mu = \mu_0 + (\bar{\tau}_n/\bar{\sigma}_n)$. Отношение средних контактных касательного и нормального напряжений названо *адгезионной составляющей среднего коэффициента трения*, т.е. $\bar{\tau}_n/\bar{\sigma}_n = \mu_a$. Тогда

$$\mu = \mu_0 + \mu_a,$$

где μ_0 — постоянная механическая составляющая коэффициента μ ; μ_a — переменная адгезионная составляющая.

Через составляющую μ_a коэффициент μ реагирует на изменение условий резания — толщины среза, переднего угла и скорости резания (рис. 4.6). Все факторы, уменьшающие адгезионную составляющую, такие как, например, действие СОЖ, снижают средний коэффициент трения. При использовании высокоэффективных

СОЖ адгезионное взаимодействие стружки и инструмента отсутствует: $\mu_a = 0$. Средний коэффициент трения становится постоянным и не зависит от условий резания.

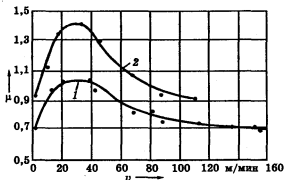


Рис. 4.6. Характер влияния скорости резания на коэффициент трения на передней поверхности при свободном резании стали 30Х при $a = 0,149$ мм:
1 — $\gamma_1 = 20^\circ$; 2 — $\gamma_2 = 40^\circ$

Аналогичным образом можно рассмотреть физическую природу коэффициента трения по задней поверхности инструмента. На этот коэффициент и его зависимость от условий резания существенно влияет адгезионная составляющая (рис. 4.7).

Ввиду специфической природы трения в зоне резания коэффициент трения нельзя определить аналитически. Для этой цели ис-

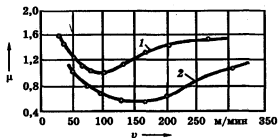


Рис. 4.7. Характер влияния скорости резания на коэффициент трения на задней поверхности при точении стали X18H10T ($S = 0,2$ мм/об, $t = 0,5$ мм):
1 — резец из твердого сплава ВК8; 2 — из сплава Т5К10

пользуют специальные устройства типа «разрезной резец» [3] или зависимости, подобные предложенной Н.Н. Зоревым [4]:

$$\mu_n = \frac{\sqrt{[P_z \sin \gamma + (P_y \cos \varphi + P_x \sin \varphi) \cos \gamma]^2 + (P_y \sin \varphi - P_x \cos \varphi)^2}}{P_z \cos \gamma - (P_y \cos \varphi + P_x \sin \varphi) \sin \gamma}$$

где P_z , P_y , P_x — составляющие силы резания, измеренные экспериментальным путем.

Наростообразование при резании металлов

4.3.

Резанию многих материалов при определенных условиях сопутствует явление, называемое наростообразованием. Под *наростом* понимают клиновидную относительно неподвижную область материала, расположенную на передней поверхности лезвия вдоль его режущей кромки (рис. 4.8). Нарост — сложное по химическому составу агрегатное состояние металла из продуктов взаимодействия обрабатываемого и инструментального материалов и окружающей среды. Представляет собой слой сильно деформированного обрабатываемого материала с включениями оксидов и карбидов обрабатываемого и инструментального материалов, а также кобальта, входящего в состав твердого сплава [5]. Строение нароста сложное: основная его часть — это «третье тело», прочно соединенное с поверхностью инструмента, на которое наращиваются последующие



Рис. 4.8. Нарост на резце из быстрорежущей стали после обработки алюминия

слои сходящей стружки; остальные части нароста расположены на основной, имеют иное происхождение и являются частью застойной зоны. («Третье тело» — частицы, образующиеся в зоне контактирования двух трущихся тел, отличающиеся от них составом и свойствами.)

Основная часть нароста после формирования выполняет функции передней поверхности инструмента. Вследствие этого уменьшается длина контакта стружки с передней поверхностью, т.е. происходит «укорочение» последней. При воздействии укороченной передней поверхности инструмента на срезаемый слой в переходной пластически деформируемой зоне возникает объемная пластическая деформация. Металл деформируется не только в плоскости стружкообразования, но и вдоль режущих кромок инструмента. При металлографическом анализе застойная зона имеет вид эквидистантных полос, приближающихся по форме к эллиптическим, причем каждая из них замыкается на давящей поверхности инструмента, роль которого выполняет основная часть нароста. При интенсивном схватывании обрабатываемого и инструментального материалов и высокому пределу прочности на сдвиг сформированных в застойной зоне вторичных структур может происходить трансформация застойной зоны или ее части в нарост.

Процесс образования нароста схематично можно представить следующим образом. При определенных температурах и высоких давлениях в зоне резания химически чистые (ювенильные) поверхности стружки и инструмента подвергаются адгезионному схватыванию: происходит прочное присоединение контактного слоя стружки к передней поверхности инструмента и образование заторможенного слоя. Обтекание этого слоя стружкой способствует возникновению новых заторможенных слоев металла, которые нарастают друг на друга, пока нарост не достигнет размеров, максимально возможных при данных условиях. Шероховатая поверхность каждого вновь образованного заторможенного слоя создает благоприятные условия для проникновения кислорода воздуха и его диффундирования в поверхностные слои металла. Оксидные пленки уменьшают трение между стружкой и поверхностью нароста, и каждый последующий заторможенный слой становится короче предыдущего, что приводит к образованию нароста клиновидной формы. При достижении определенной высоты прочность нароста оказывается недостаточной и он разрушается. Разрушению нароста способствует и то, что он не полностью охватывается стружкой, т.е. между наростом, стружкой и поверхностью резания появляются зазоры,

в результате чего он перестает находиться в условиях всестороннего сжатия.

Разрушенный нарост частично уносится стружкой, частично — поверхностью детали. Так как сходящая стружка скользит не по вершине резца, а по передней поверхности нароста, действительный передний угол лезвия $\gamma_d = \gamma_n$ увеличивается, что способствует облегчению процесса резания. Вследствие высокой твердости нарост, выполняя функции режущего лезвия, отчасти предохраняет переднюю и заднюю поверхности инструмента от истирания сходящей стружкой и обработанной поверхностью и уменьшает нагревание. Это приводит к уменьшению износа инструмента, т.е. к повышению периода его стойкости. Наличие нароста увеличивает шероховатость обработанной поверхности, поскольку при разрушении нароста часть его уносится стружкой, а часть остается на обработанной поверхности детали.

Размеры нароста зависят от соотношения сил трения между обрабатываемой стружкой и передней поверхностью лезвия инструмента и сил сцепления (сопротивления сдвигу) обрабатываемого и инструментального материалов; чем больше сила трения превышает силу сцепления, тем больше размеры нароста.

С помощью скоростной киносъемки установлено, что в большинстве случаев нарост — образование нестабильное. В каждой точке режущей кромки он возникает, увеличивается до максимальной высоты, затем частично или полностью разрушается, причем частота срывов может достигать 1000 или даже 2000 Гц.

Нарост не следует путать с налипками. *Налипы* появляются на передней поверхности при резании практически всегда. Они представляют собой вытянутые вдоль направления схода стружки наслоения длиной до 10 мкм, высотой 3...5 мкм, шириной 5...10 мкм. При резании с наростом вблизи него возникают налипсы, размеры которых в 2–3 раза больше указанных. Отличительная особенность налипов — соответствие их структуры структуре обрабатываемого материала.

С учетом встречающихся форм наростов и особенностей их контакта с передней и задней поверхностями лезвия предложена следующая их классификация.

При относительно низких скоростях резания образуется нарост первого вида (рис. 4.9, а). Он имеет форму, близкую к треугольной, небольшой радиус округления вершины, мало развит по высоте. Задний угол нароста близок к нулю, поэтому он практически не выступает за заднюю поверхность инструмента. Передний угол на-

роста велик. Как следствие, сходящая стружка контактирует с передней поверхностью инструмента за наростом. Структура нароста имеет вид слоев, почти параллельных передней поверхности (с замыканием концов этих слоев на передней поверхности).

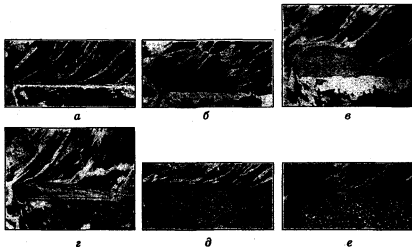


Рис. 4.9. Динамика наростообразования при точении стали 40 с различными скоростями резания [4]:

$a - v = 2$ м/мин; $b - v = 9$ м/мин; $в - v = 30$ м/мин; $г - v = 40$ м/мин;
 $д - v = 100$ м/мин; $e - v = 150$ м/мин; $a = 0,265$ мм; $\gamma = 10^\circ$

При более высоких скоростях образуется нарост второго вида (рис. 4.9, б). Он имеет значительную высоту, большой передний угол и задний угол, достигающий $5...12^\circ$. Стружка постоянно контактирует с передней поверхностью нароста, примыкающей к его вершине, а с остальной частью контакт прерывистый. Основание нароста, примыкающее к передней поверхности, достаточно стабильно, а его верхняя часть часто разрушается и уносится стружкой или поверхностью резания. На прирезочной стороне стружки заметна зона вторичных деформаций.

С дальнейшим возрастанием скорости резания этот нарост преобразуется в нарост третьего вида (рис. 4.9, в, г). Его форма становится прямоугольной или близкой к трапециевидной, он имеет значительную высоту. Действительный передний угол режущего клина чаще всего небольшой, иногда меньше нуля ($\gamma_d = -5...15^\circ$). Нарост значительно выступает за заднюю поверхность и защищает

ее от непосредственного контакта с поверхностью резания. Фактически — это инструмент с укороченной передней поверхностью. Над вершиной нароста развивается застойная зона, а на стружке заметна вторичная деформация. Наросты такого вида наиболее стабильны, их срыв происходит крупными частицами или полностью.

Наконец, при еще более высоких скоростях резания возникает нарост четвертого вида (рис. 4.9, *д*), по форме и расположению близкий к первому. За счет малой высоты и большого действительного переднего угла сходящая стружка входит на некотором расстоянии от режущей кромки в плотный контакт с передней поверхностью. Текстура такого нароста выражена слабо. Это — нестабильное образование, постоянно изменяющееся во всем объеме. Разрушение его происходит не за счет срыва, а путем постоянного «стекания» с лезвия. При этом нарост размазывается по поверхности резания и прирезцовой стороне стружки. При дальнейшем возрастании скорости резания нарост исчезает (рис. 4.9, *е*).

Возникновение наростов описанных разновидностей характерно для обработки сталей и чугунов [6]; они встречаются при различных сочетаниях режимов резания, что обусловлено разными условиями трения на площадке контакта. Сила трения зависит от температуры в зоне образования стружки, т.е. температуры, которая определяется скоростью резания. Поэтому основной причиной изменения условий наростообразования с изменением скорости резания является температура резания. От нее в значительной степени зависит коэффициент трения стружки о переднюю поверхность инструмента. При низких скоростях, когда температура в зоне резания невелика, коэффициент трения относительно небольшой, поэтому нароста еще нет или он очень мал (рис. 4.10). При повышении скорости резания растет температура, а следовательно, и коэффициент трения стружки о переднюю поверхность инструмента, который становится максимальным при достижении какой-то определенной температуры. В этот момент нарост наибольший. При дальнейшем повышении скорости и температуры резания наступает размягчение пограничных слоев металла; уменьшаются коэффициент трения и размеры нароста.

Высота нароста зависит также от физико-механических свойств обрабатываемого металла (пластичности, прочности), толщины среза, величины переднего угла инструмента, условий охлаждения и смазывания в зоне резания и т.д. (рис. 4.11). Из рисунка видно, что чем менее пластичен материал ($HB_1 < HB_2$, рис. 4.11, *а*), меньше толщина срезаемого слоя ($a_1 > a_2 > a_3$, рис. 4.11, *б*), больше передний угол ($\gamma_1 < \gamma_2 < \gamma_3$, рис. 4.11, *в*), тем меньше высота нароста.

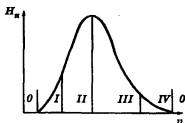


Рис. 4.10. Зависимость высоты нароста H_n от скорости резания: 0 — нарост отсутствует, I–IV — образуются наросты различных видов

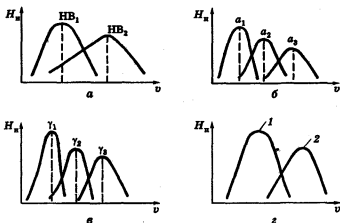


Рис. 4.11. Влияние условий резания на высоту нароста

Характер рассмотренных зависимостей объясняется условиями трения стружки о переднюю поверхность инструмента и температурой в зоне резания. Чем выше скорость резания v , тем выше и температура Θ в зоне резания. Факторы, способствующие повышению температуры резания, вызывают сдвиг кривой влево. Факторы, способствующие уменьшению трения, приводят к уменьшению Θ , а следовательно, и нароста, и кривая смещается вправо (рис. 4.11, в, г).

С применением СОЖ кривая зависимости $H_n = f(v)$ переходит из положения 1 в положение 2 (рис. 4.11, г). Таким образом, при данном обрабатываемом металле и постоянных условиях смазывания размеры и форма нароста определяются только температурой на пе-

редней поверхности лезвия инструмента. Скорость резания, толщина среза, передний угол влияют постольку, поскольку они влияют на температуру резания.

Закономерности изменения размеров нароста аналогичны закономерностям изменения высоты неровностей на обработанной поверхности в зависимости от скорости резания. Это объясняется тем, что при разрушении частицы нароста остаются на обработанной поверхности, резко ухудшая ее шероховатость (рис. 4.12).

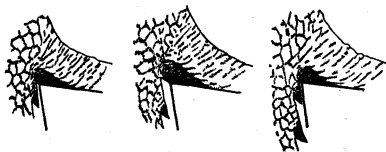


Рис. 4.12. Влияние нароста на формирование микрорельефа обработанной поверхности

Все материалы, подвергаемые обработке резанием, можно разделить на две группы: не склонные и склонные к наростообразованию. К первой группе относятся медь и ее сплавы, большинство титановых сплавов, белый чугун, закаленные стали, стали с большим содержанием хрома и никеля, ко второй — углеродистые и большинство легированных сталей, серый чугун, алюминиевые сплавы. При обработке этих материалов для снижения шероховатости обработанной поверхности необходимо:

□ работать в зоне таких скоростей, при которых нарост не образуется, например в зоне очень низких скоростей резания; однако это влечет за собой снижение производительности обработки, поэтому выгоднее работать в зоне высоких скоростей, при которых образовавшийся нарост не задерживается на лезвии инструмента;

□ снижать шероховатость передней поверхности режущего инструмента, применяя доводку при его заточке;

□ изменять физико-химические свойства поверхностных слоев контактных площадок инструмента путем нанесения тонкопленочных покрытий или микролегирования;

□ по возможности увеличивать передний угол лезвия (например, при $\gamma = 45^\circ$ нарост почти не образуется);

□ применять СОЖ, уменьшающие трение на передней поверхности лезвия инструмента;

□ уменьшать пластичность обрабатываемого материала путем применения специальной термической обработки или использовать стали с присадками (например, применение автоматной стали с пониженным содержанием марганца и повышенным содержанием серы, а также нормализация обрабатываемых сталей позволяют уменьшать шероховатость обработанной поверхности).

Взаимосвязь явлений в процессе

4.4. стружкообразования

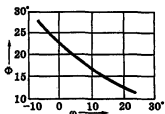
Условия резания по-разному влияют на деформационные и контактные процессы в зоне резания. Это влияние может быть непосредственным или косвенным. Например, изменение γ приводит к увеличению или уменьшению средних контактных нормальных напряжений на передней поверхности инструмента, что вызывает изменение среднего коэффициента и угла трения. Последнее оказывает влияние на угол действия, изменение которого вызывает изменение угла сдвига и работы стружкообразования.

Параметры процесса резания делятся на внутренние и внешние: к *внутренним* относятся угол действия, температура на передней поверхности инструмента, действительный передний угол с учетом нароста, ширина площадки контакта, средний коэффициент трения и др., а к *внешним* — физико-механические свойства обрабатываемого и инструментальных материалов, геометрические параметры инструмента, параметры режима резания и свойства СОЖ.

Непосредственное и наиболее сильное влияние на процесс резания оказывают угол действия, передний угол инструмента, скорость резания и свойства обрабатываемого материала. Влияние остальных факторов на процесс резания косвенное, из них наибольшее оказывает толщина срезаемого слоя.

От угла сдвига Φ зависят коэффициент укорочения стружки, относительный сдвиг и работа стружкообразования. Угол сдвига непосредственно зависит от угла действия (см. формулу К.А. Зворыкина, § 4.2). Угол действия можно изменить, изменяя средний коэффициент трения в результате применения СОЖ или за счет

снижения шероховатости передней поверхности при заточке. С увеличением угла действия угол сдвига уменьшается (рис. 4.13), что приводит к увеличению степени деформации срезаемого слоя и работы стружкообразования.



с. 4.13. Влияние переднего угла на угол сдвига при постоянном угле действия

Передний угол γ непосредственно влияет на процесс стружкообразования. С уменьшением переднего угла увеличивается угол между векторами скоростей резания v и стружки v_c . При этом изменяется направление движения срезаемого слоя (рис. 4.14, а), уменьшается угол сдвига и увеличивается степень деформации срезаемого слоя (рис. 4.14, б).

При обработке металлов без образования нароста косвенное влияние переднего угла инструмента на процесс формирования стружки связано только с изменением угла действия вследствие изменения ориентации передней поверхности и среднего коэффициента трения. С уменьшением переднего угла γ угол действия увеличивается из-за изменения положения передней поверхности и уменьшается из-за уменьшения среднего коэффициента трения. Первое воздействие является преобладающим.

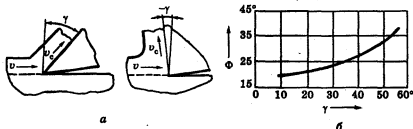


Рис. 4.14. Влияние угла действия на угол сдвига при постоянном переднем угле инструмента

При обработке с образованием нароста влияние γ на процесс формирования стружки менее ощутимо, поскольку чем меньше передний угол инструмента, тем больше высота нароста и действительный передний угол.

Непосредственное влияние скорости резания на процесс стружкообразования выражается в изменении угла сдвига. При малых скоростях зона первичной деформации OAB (рис. 4.15, а) имеет сравнительно большие размеры. С увеличением скорости резания срезаемый слой очень быстро проходит через поле напряжений, и пластические деформации не успевают произойти на нижней границе OA зоны деформации. В результате она смещается в положение OA' , а верхняя — в положение OB' , т.е. зона первичной деформации $OA'B'$ становится уже и смещается по ходу часовой стрелки. Это приводит к увеличению угла сдвига и уменьшению степени деформации срезаемого слоя (рис. 4.15, б).

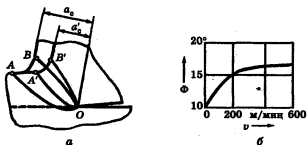


Рис. 4.15. Влияние скорости резания на угол сдвига при постоянном угле действия

Косвенное влияние скорости резания v на процесс стружкообразования проявляется в ее влиянии на угол действия за счет изменения среднего коэффициента трения и угла γ_d в случае образования нароста. Средний коэффициент трения изменяется с изменением v в силу того, что при этом изменяются средние нормальные контактные напряжения и температура резания, влияющая на сопротивление сдвигу в контактном слое стружки. Таким образом, при работе без образования нароста увеличение скорости резания облегчает процесс стружкообразования, уменьшает относительный сдвиг и удельную работу стружкообразования.

При обработке металла с образованием нароста влияние скорости резания на процесс стружкообразования в значительной степени определяется температурой резания. Например, исследованиями

установлено, что при обработке сталей нарост достигает максимальных размеров при $\Theta \approx 300^\circ\text{C}$ и исчезает при $\Theta \approx 600^\circ\text{C}$. Изменение скорости и температуры влечет за собой соответствующие изменения γ_d , H_n , K_t и др. (рис. 4.16). Только при таких скоростях резания, когда температура в зоне резания превышает 600°C , увеличение v улучшает все показатели стружкообразования.

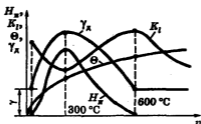


Рис. 4.16. Взаимосвязи скорости резания, температуры, высоты нароста, действительного переднего угла и коэффициента укорочения стружки

Непосредственное влияние механических свойств материала на процесс стружкообразования проявляется в увеличении угла сдвига с повышением сопротивления движению материала в зоне стружкообразования при постоянных значениях углов γ и ω (рис. 4.17). Степень деформации срезаемого слоя при этом уменьшается.

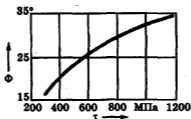


Рис. 4.17. Влияние сопротивления сдвигу τ обрабатываемого материала в зоне стружкообразования на угол сдвига при постоянных переднем угле лезвия и угле действия

Косвенное влияние свойств обрабатываемого материала на процесс стружкообразования, если нарост при резании не образуется, проявляется в изменении угла действия из-за изменения среднего коэффициента трения. При постоянной температуре резания сред-

ний коэффициент трения для различных обрабатываемых материалов изменяется мало, так как при увеличении сопротивления материала пластической деформации одновременно растут касательные и нормальные контактные напряжения. При постоянной скорости v с увеличением сопротивления материала пластическим деформациям средний коэффициент трения уменьшается, что изменяет K_f и ϵ .

Если резание протекает с образованием нароста, косвенное влияние свойств обрабатываемого материала на процесс стружкообразования проявляется в изменении действительного переднего угла.

Толщина срезаемого слоя влияет на процесс стружкообразования только косвенно. При отсутствии нароста изменение a обуславливает изменение μ . Из-за увеличения средних нормальных контактных напряжений на передней поверхности инструмента μ снижается при увеличении a . Чем больше толщина срезаемого слоя, тем меньше относительный сдвиг и удельная работа стружкообразования. При обработке металла с образованием нароста толщина срезаемого слоя влияет на процесс стружкообразования посредством изменения действительного переднего угла.

Таким образом, между процессами в зоне первичной деформации и на передней поверхности инструмента существует тесная и взаимообусловленная связь. Любое изменение условий трения на площадке контакта влияет на протекание деформационных процессов и характер стружкообразования. Наоборот, изменение условий стружкообразования посредством изменения температуры и скорости резания влияет на контактные процессы в зоне резания. Иначе говоря, всякое изменение напряженного состояния в одной из зон вызывает соответствующее изменение напряженного состояния в другой зоне. В результате в процессе резания за счет саморегулирования в зонах первичной деформации и на передней поверхности инструмента устанавливаются такие напряженные состояния, при которых соблюдается условие равновесия стружки.

Литература

1. Абуладзе Н.Г. Определение длины контакта сливной стружки с передней поверхностью инструмента / Н.Г. Абуладзе // Тр. Грузин. политехн. ин-та. 1969. № 3 (131). С. 131-137.
2. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. М.: Машиностроение, 1975.
3. Гордон М.Б. Исследование трения и смазки при резании металлов / М.Б. Гордон // Трение и смазка при резании металлов. Чебоксары: ЧГУ, 1972. С. 7-137.

4. *Зорев Н.Н.* Вопросы механики процесса резания металлов / Н.Н. Зорев. М.: Машгиз, 1956.
5. *Клушин М.И.* К характеристике контактного взаимодействия стружки с инструментом / М.И. Клушин, М.С. Беккер, М.В.Гордон // *Вопр. теории действия СОТС в процессе обработки металлов резанием.* Горький: ГПИ, 1975. С. 54–66.
6. *Клушин М.И.* Резание металлов / М.И. Клушин. М.: Машгиз, 1958.
7. *Коженкова Т.И.* Лабораторные работы по резанию металлов / Т.И. Коженкова, Е.Э. Фельдштейн. Мн.: Выш. шк., 1985.

СИЛЫ И РАБОТА РЕЗАНИЯ. ВИБРАЦИИ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СТАНОЧНЫХ СИСТЕМАХ

Напряжения в зоне резания при

5.1. свободном прямоугольном резании

Рассмотрим процесс врезания режущего лезвия в обрабатываемый материал. При срезании слоя металла на передней поверхности действуют элементарные силы, нормальные и касательные к ней. Их можно свести к одной равнодействующей R' , являющейся суммой силы $N_{\text{п}}$, нормальной к передней поверхности, и силы трения $F_{\text{п}}$ (рис. 5.1). Сила R' называется *силой стружкообразования*. Ее направление определяется углом действия ω , под которым сила R' направлена относительно скорости резания v . Угол действия для схемы с единственной плоскостью сдвига можно найти как $\omega = \theta - \gamma$, где θ — угол трения на передней поверхности лезвия (см. гл. 4).

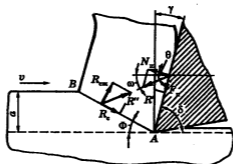


Рис. 5.1. Силы резания, возникающие на передней поверхности и в плоскости сдвига

Сила R' уравновешивается сопротивлением обрабатываемого материала движению резания. Оно выражается силой R'' , являющейся геометрической суммой напряжений, возникающих в зоне струж-

кообразования. Сила R'' складывается из двух составляющих — силы сдвига R_c , действующей в плоскости сдвига AB , и перпендикулярной к ней силы сжатия $R_{сж}$. Если пренебречь внутренними нормальными напряжениями в плоскости сдвига от действия силы сжатия, то сила стружкообразования

$$R'' = \frac{\tau_c ab}{\sin(\delta + \theta + \Phi) \sin \Phi} = \frac{\tau_c ab}{\cos(\gamma - \theta - \Phi) \sin \Phi},$$

где τ_c — напряжение сдвига; Φ — угол сдвига [4].

Из формулы видно, что сила стружкообразования зависит от прочностных характеристик обрабатываемого материала, площади сечения среза, а также от углов резания, трения и сдвига. Если при механических испытаниях деформация есть результат приложения силы, то при резании, наоборот, сила определяется деформацией. Поэтому изменение условий резания приводит к изменению величин, входящих в систему сил.

Предварительная пластическая деформация сжатия под действием силы стружкообразования R' распространяется на область, лежащую частично ниже линии среза (см. гл. 3). При движении режущего клина вперед деформированный поверхностный слой начинает вследствие упругого восстановления действовать на заднюю поверхность лезвия. Силы на этой поверхности возникают даже при резании остро заточенным инструментом. При значительном радиусе округления они увеличиваются, так как обрабатываемый материал частично срезается, а частично вдавливается в поверхность резания (рис. 5.2). Таким образом, в результате упругопла-

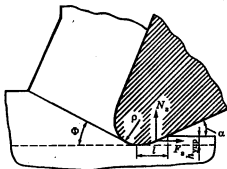


Рис. 5.2. Силы резания, возникающие на задней поверхности

стического контактирования задней поверхности и поверхности резания возникают нормальная сила N_3 и сила трения F_3 . Они возрастают при увеличении напряжения сдвига τ_c , ширины среза b и фаски износа на задней поверхности лезвия. Зависимость сил N_3 и F_3 от толщины среза незначительна, а многие ученые считают, что это влияние вообще отсутствует [1, 3].

Рассмотрим систему сил, возникающих при свободном резании (рис. 5.3, а). На переднюю поверхность реза давит стружка с силой R_n , которая является равнодействующей нормальной силы N_n и силы трения стружки о переднюю поверхность F_n , т.е. $\vec{R}_n = \vec{N}_n + \vec{F}_n$. В то же время на заднюю поверхность реза вблизи режущей кромки действует нормальная сила упругого противодействия обрабатываемого материала N_3 и сила трения о заднюю поверхность инструмента F_3 . Они дают результирующую силу R_3 . Так как задний угол α мал, а при наличии площадки износа на некотором участке задней поверхности он равен нулю, в расчетной схеме принимаем направление сил F_3 и N_3 , как показано на рис. 5.3, б, т.е. направление F_3 противоположно вектору скорости резания v . Для осуществления процесса резания или сохранения равновесия реза к нему извне должна быть приложена сила, равная по величине и противоположная по направлению силе $\vec{R} = \vec{R}_n + \vec{R}_3$ (рис. 5.3, в).

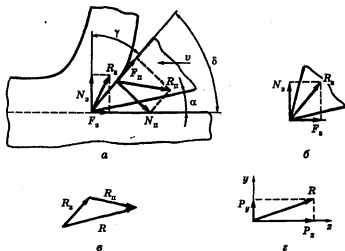


Рис. 5.3. Система сил, действующих при свободном резании

Разложим силу R , приложенную к резцу, на две составляющие: P_z в направлении главного движения резания (назовем ее *главной силой резания*) и P_y в направлении, совпадающем с осью резца (назовем ее *радиальной силой*). Спроецируем действующие силы на оси y и z (рис. 5.3, з):

$$P_z = N_n \cos \gamma + F_n \sin \gamma + F_s; \quad P_y = -N_n \sin \gamma + F_n \cos \gamma + N_s.$$

Силы, действующие на передней и задней поверхностях инструмента, а также вдоль осей y и z , можно рассчитать теоретически на основе теорий пластичности, упругости и др. Теоретические уравнения, однако, сложны и не совсем точны; в них используются коэффициенты, которые характеризуют свойства обрабатываемого материала и числовые значения которых неизвестны. Поэтому на практике силы резания определяют экспериментальным путем.

5.2. Измерение сил резания

Наиболее часто силы резания определяют путем непосредственного измерения с помощью специальных приборов, называемых *динамометрами*. Деформации упругих элементов динамометра непосредственно или с использованием связанных с ними явлений служат основой для измерения сил резания. Независимо от конструкции динамометры состоят из следующих основных частей: датчика, воспринимающего нагрузку; регистрирующего устройства; вспомогательных звеньев, связывающих их друг с другом.

Динамометры подразделяются на гидравлические, механические, электрические.

Гидравлические динамометры в настоящее время не находят применения по причине большой инерционности рычажно-поршневой системы, из-за чего показания отстают от быстропротекающих процессов и искажают картину изменения сил резания во времени и по величине, а также из-за малой чувствительности.

Принцип работы **механических динамометров** (рис. 5.4) основан на том, что под действием сил резания на резец 9 резцедержатель 8 вследствие деформации упругих стенок 1 корпуса 6 перемещается. Эти перемещения через сухари 2 и ножки 4, 7 фиксируются индикаторами 3 и 5. Механические динамометры просты по конструкции, но имеют те же недостатки, что и гидравлические, и поэтому получили ограниченное распространение.

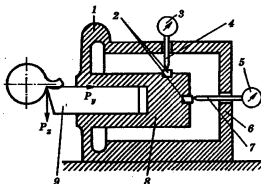


Рис. 5.4. Схема механического динамометра

Электрические динамометры являются наиболее чувствительными приборами, так как они мало инерционны и позволяют с помощью осциллографа производить запись быстропротекающих процессов за тысячные и стотысячные доли секунды. Такие динамометры преобразуют механическое воздействие сил резания в легко измеряемые электрические величины.

Электрические датчики подразделяются на емкостные, или конденсаторные, индуктивные, тензометрические, пьезоэлектрические и др.

В емкостных датчиках упругая пластина конденсатора перемещается под действием силы резания, изменяя воздушный зазор, а следовательно, и емкость конденсатора. Изменение емкости с помощью высокочастотного устройства приводит к колебанию силы тока, регистрируемой с помощью гальванометра или осциллографа.

Действие индуктивных датчиков основано на изменении индуктивности токонесущего контура, а следовательно, и силы тока в обмотке в зависимости от воздушного зазора между ферромагнитными телами. Изменение силы резания влияет на регистрируемый ток.

Тензометрические датчики представляют собой несколько витков очень тонкой проволоки, изготавливаемой из специального сплава, которая изменяет электрическое сопротивление при деформации датчика. Витки или решетку из такой проволоки помещают между двумя полосками, склеенными из бумаги или диэлектрической фольги, и наклеивают на исследуемый объект, на-

пример державку резца. Под влиянием сил резания державка и приклеенная к ней проволока упруго деформируются. Это вызывает в электрической цепи изменение силы тока, которая увеличивается усилителем и измеряется регистрирующим прибором. Чтобы в показаниях приборов не было искажений при измерении сил резания из-за непостоянства напряжения в сети, в электрическую цепь между регистрирующим прибором и источником питания необходимо включать стабилизатор напряжения.

Принцип действия пьезоэлектрических датчиков основан на способности некоторых кристаллов, например кварца, генерировать электрический ток под действием механической нагрузки.

В зависимости от того, сколько составляющих сил резания можно измерить динамометром, они бывают одно-, двух- или трехкомпонентными. Динамометры укомплектованы усилителями и регистрирующими устройствами; в настоящее время для регистрации сигнала широко используются компьютеры.

Примеры некоторых современных динамометров приведены на рис. 5.5.

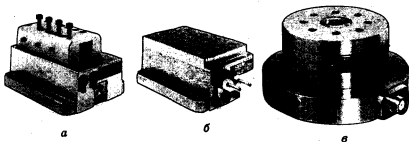


Рис. 5.5. Пьезоэлектрические многокомпонентные динамометры фирмы «Kistler»:

a — токарный; *b* — фрезерный, шлифовальный; *c* — сверлильный

Динамометры не позволяют определять непосредственно силы резания; их показания соответствуют деформациям, пропорциональным действующей силе. Поэтому перед работой динамометр необходимо протарировать. Тарирование заключается в том, что динамометр нагружают в направлении действия сил резания сначала возрастающими, а затем убывающими силами, которые известны. Показания динамометра, соответствующие определенным си-

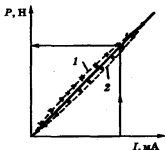


Рис. 5.6. Тарировочный график силы резания:
1 — нагружение; 2 — разгрузке

лам, регистрируются. На основании этих данных по средней линии нагрузки и разгрузки строят тарировочный график (рис. 5.6), которым в дальнейшем пользуются при расшифровке показаний динамометра. Данные тарировки могут быть занесены в память компьютера и непосредственно использоваться для расшифровки показаний динамометра.

Факторы, влияющие на силу резания при свободном резании

Зависимость силы резания от ширины и толщины среза. Толщина a и ширина b среза не в одинаковой степени влияют на силу резания. Сила резания возрастает пропорционально b , но отстает от увеличения a .

На рис. 5.7 показаны различные условия резания при одинаковой площади среза. Найденная закономерность $P_z = f(a, b)$ имеет вид

$$P_z = C_{P_z} b^{x_{P_z}} a^{y_{P_z}}.$$

При обработке различных материалов (стали, чугуна, бронзы) в среднем $x_{P_z} = 1,0$, $y_{P_z} = 0,75$, $C_{P_z} = 1500 \dots 2000$.

Отставание роста силы резания от увеличения толщины среза можно объяснить следующим: с увеличением толщины среза нагрузка на единицу длины режущего лезвия возрастает. В связи с этим увеличивается температура резания Θ , что приводит к снижению сопротивления обрабатываемого материала пластическому

деформированию. Пластические деформации и напряжения распределяются по толщине стружки неравномерно. Они значительно больше в слоях, прилегающих к передней поверхности лезвия инструмента. Поэтому увеличение толщины среза приводит к относительному уменьшению слоя с максимальными деформациями. Кроме того, сила трения F_z , действующая по задней поверхности лезвия как одна из слагаемых силы резания, с изменением толщины среза остается неизменной или изменяется очень мало.

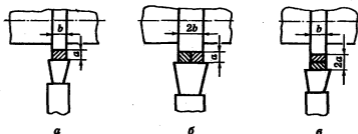


Рис. 5.7. Схемы для определения влияния параметров поперечного сечения среза на силу резания при исходном значении ширины и толщины среза (а), увеличенных значениях ширины (б) и толщины (в) среза

Таким образом, при сохранении площади поперечного сечения среза постоянной силы резания уменьшаются по мере уменьшения ширины и одновременно увеличения толщины среза.

Для весьма приблизительного определения силы резания P_z исходя из площади поперечного сечения среза иногда используют удельную силу резания k_c , т.е. силу, приходящуюся на 1 мм^2 поперечного сечения среза:

$$P_z = abk_c,$$

где a, b — толщина и ширина срезаемого слоя.

Уровень удельной силы резания зависит от толщины среза:

$$k_c = Ca^{-m}.$$

В данном уравнении C — постоянная, которую можно найти, приняв $a = 1 \text{ мм}$. Тогда

$$P_z = ba^{1-m}k_{c1.1},$$

где $k_{c1.1}$ — удельная сила резания при $b \times a = 1 \times 1 \text{ мм}^2$.

Характер зависимости удельной силы резания от толщины среза различен для разных уровней последней (рис. 5.8). Исследова-

ния [11] показали, что в широком диапазоне толщин среза можно выделить три диапазона, в которых наблюдается три различные закономерности изменения k_c (рис. 5.9): 1) при $a < 0,01$ мм показатель степени $m = 0,15$; при $a < 0,1$ мм $m = 0,44$; при $a > 0,1$ мм $m = 0,764$.

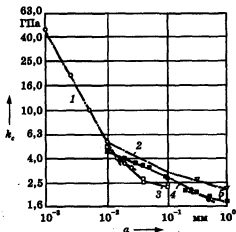


Рис. 5.8. Зависимость удельной силы резания от толщины среза при разных способах обработки [11]:

1 — сталь Ck45 — быстрорежущая сталь S6-5-2, протягивание; 2 — сталь Ck45 — твердый сплав, точение; 3 — сталь C45V — быстрорежущая сталь S2-9-2-8, протягивание; 4 — сталь Ck45 — быстрорежущая сталь S12-1-4-5, протягивание; 5 — сталь C45 — быстрорежущая сталь, точение

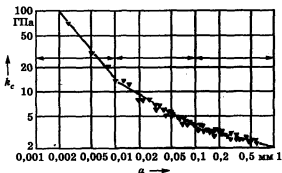


Рис. 5.9. Зависимость удельной силы резания от толщины среза при фрезеровании [11]

В справочной литературе и каталогах зарубежных фирм обычно приводятся значения $k_{c0,4}$ и $k_{c1,0}$, где числа обозначают толщину среза. Некоторые значения удельных сил приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Удельные силы резания для ряда обрабатываемых материалов, МПа

Обрабатываемый материал	Толщина среза, мм	
	0,4	1,0
Углеродистые стали	2000...2180	1500...1700
Низколегированные стали:		
в состоянии поставки	2100	1700
после улучшения	2775	2000...2300
Высоколегированные стали в состоянии поставки	2500	1950
Инструментальные стали после закалки	3750	3100
Стальное литье	1800...2500*	1400...1950*
Серый чугун	1100...1400	900...1100
Ковкий чугун	950...1100	800...900
Нержавеющие стали в состоянии поставки	2100...2600**	1800...2000**
Титановые сплавы	1530...1690	1300...1400
Алюминиевые сплавы	500...950**	400...700**
Латуни, оловянистые бронзы	700	550
Безоловянистые бронзы	1750	1350

* Возрастает с ростом содержания углерода.

** В зависимости от химического состава и микроструктуры.

Зависимость сил резания от свойств обрабатываемого металла. При снятии стружки металл не только срезается, но и претерпевает сильную пластическую деформацию. Большое влияние на силы резания оказывают силы трения стружки и обрабатываемого материала соответственно о переднюю и заднюю поверхности лезвия инструмента. Однако необходимо учитывать, что в процессе обработки металл в зоне резания сильно разогревается. Следовательно, его свойства могут отличаться от свойств, которые характерны для него при статических испытаниях. Поэтому нет точной и однозначной зависимости между силой P_z и временным сопротивлением обрабатываемого материала, а также его твердостью и другими механическими характеристиками. Установлено, что силы резания растут при увеличении σ_s , твердости, пластичности и вязкости об-

рабатываемого материала. На практике для сталей и чугунов при расчете силы P_z в зависимости от σ_s и НВ используются следующие эмпирические формулы:

$$P_z = C_m \sigma_s^q; \quad P_z = C_m \text{НВ}^q,$$

где $q \approx 0,5$ (этот показатель степени для всех металлов всегда меньше единицы).

Влияние свойств инструментального материала на силу резания. Это влияние может быть вызвано только различием в силах трения (коэффициентах трения) между обрабатываемым и инструментальными материалами. Внутри групп быстрорежущих сталей и вольфрамокобальтовых твердых сплавов коэффициенты трения и укорочения стружки не различаются, а следовательно, сила P_z не изменяется.

При обработке инструментами, оснащенными вольфрамтитановыми твердыми сплавами, P_z уменьшается с увеличением содержания карбидов титана TiC. Для сравнения отметим, что если при обработке инструментом из быстрорежущей стали принять $P_z = 1$, для тех же условий работы инструмента, оснащенного твердыми сплавами группы ВК, $P_z = 1$, а группы ТК — $P_z = 0,90 \dots 0,95$.

Влияние скорости резания на силу резания. Ранее считалось, что скорость резания практически не влияет на его силу. Объясняется это проведением работ в сравнительно узком диапазоне скоростей, а также недостаточной чувствительностью используемых при этом динамометров. В настоящее время известно, как изменяется сила резания в широком диапазоне скоростей. Выясним эту зависимость на примере опытов для условий свободного резания стали 40X, которые проводились при изучении деформации стружки (см. § 3.6). Прежде всего необходимо отметить полную идентичность зависимостей $P_z = f(v)$ и $K_1 = f(v)$. В тех областях скоростей резания, где уменьшается коэффициент укорочения стружки, снижается сила резания, и наоборот (рис. 5.10). Однако это не случайное совпадение, а закономерность. Возрастание значения K_1 свидетельствует об уменьшении угла сдвига Φ и соответственно увеличении площади поверхности, по которой происходит сдвиг. При этом повышается степень деформации металла, т.е. происходит его упрочнение, а значит, возрастают напряжения, при которых происходит сдвиг. Увеличение напряжения и площади сдвига приведет к росту силы резания. Кроме того, сила резания и коэффициент укорочения зависят от коэффициента трения при деформировании срезаемого слоя [1,3].

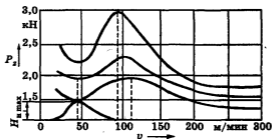


Рис. 5.10. Зависимость сил резания от скорости резания и переднего угла при обработке стали 40X с $a = 0,2$ мм, $b = 4$ мм

Сложный характер кривых $P_z = f(v)$ объясняется появлением нароста на передней поверхности лезвия инструмента. Минимальные значения силы на кривых $P_z = f(v)$ соответствуют максимально возможному наросту. При малой скорости резания, когда нарост не образуется, сила резания велика. В диапазоне скоростей, при которых наблюдается максимальное наростообразование, сила резания и укорочение стружки уменьшаются, так как с увеличением размеров нароста возрастает действительный передний угол инструмента. По мере дальнейшего повышения скорости резания высота нароста, а следовательно, и действительный передний угол уменьшаются. Одновременно с этим возрастают коэффициент укорочения стружки и силы резания.

Как уже отмечалось, работа на очень высоких скоростях резания приводит к значительному повышению температуры резания, в результате чего уменьшается коэффициент трения, а следовательно, и P_z .

Минимумы и максимумы кривых $P_z = f(v)$ тем рельефнее, чем меньше передний угол. Объясняется это тем, что больший нарост может образоваться (и образование его интенсивнее) при меньших передних углах инструмента. При обработке чугуна образуется меньший нарост, поэтому зависимость $P_z = f(v)$ имеет вид плавной кривой (рис. 5.11). Аналогично выглядят зависимости $P_z = f(v)$ для материалов, не склонных к наростообразованию, — меди, жаропрочных и нержавеющей сталей и сплавов, титановых сплавов.

Влияние переднего и заднего углов на силу резания. При увеличении переднего угла γ облегчается врезание зубьев инструмента в деталь, улучшается сход стружки, уменьшается деформация обрабатываемого металла и снижается коэффициент укорочения стружки, а следовательно, уменьшается P_z .

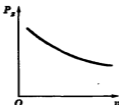


Рис. 5.11. Характер зависимости $P_z = f(v)$ при обработке чугуна

Влияние заднего угла на силу резания устанавливают исходя из способности металла упруго восстанавливаться. С уменьшением угла α увеличивается контакт задней поверхности инструмента с обрабатываемой деталью, что приводит к росту сил трения и резания. Этому способствует то обстоятельство, что после прохождения режущего лезвия металл упруго восстанавливается, образуя дополнительную площадку контакта инструмент — деталь на длине l (см. рис. 5.2). Чем больше α , тем меньше длина контакта l , а следовательно, и P_z .

Таким образом, интенсивность влияния α на силы резания невелика. С увеличением заднего угла α от 2° до 10° P_z уменьшается на 6 %, а P_y — на 17 %. При дальнейшем увеличении угла α силы резания остаются почти постоянными.

5.4. Силы резания при несвободном резании

Силы резания при точении. В условиях несвободного резания при точении равнодействующую силу сопротивления резанию R раскладывают на три составляющие (рис. 5.12): P_z — *главную силу резания*, которая действует в направлении скорости главного движения; P_y — *радиальную силу*, направленную по радиусу главного вращательного движения резания в вершине лезвия; P_x — *осевую силу*, действующую параллельно оси главного вращательного движения резания, т.е. силу подачи. По P_z производят расчеты прочности и жесткости резца, а также мощности, необходимой на осуществление резания. Однако правильнее было бы точные расчеты резца производить на деформацию косоугольного изгиба от действия силы

$$R' = \sqrt{P_z^2 + P_y^2}.$$

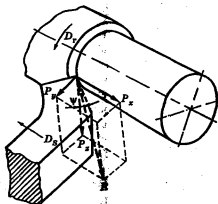


Рис. 5.12. Разложение силы резания при точении на три составляющие

При определении прогиба детали, прочности и жесткости отдельных деталей станка за основу принимают силу P_y , а прочность и жесткость механизма подачи станка рассчитывают по силе P_x . Установлено, что при точении конструкционных сталей и чугунов резцом с геометрическими параметрами $\phi = 45^\circ$, $\gamma = 15^\circ$, $\lambda = 0^\circ$ наблюдается следующее соотношение сил резания: $P_y = (0,4 \dots 0,5)P_z$, $P_x = (0,3 \dots 0,4)P_z$, а при точении жаропрочных сталей сила P_y может быть больше, чем P_x . Это же соотношение наблюдается и при точении практически всех материалов с малыми сечениями среза. С увеличением угла ϕ и уменьшением переднего угла γ отношение P_y/P_z уменьшается, а P_x/P_z увеличивается. Кроме того, относительные значения P_x и P_y возрастают с увеличением износа резца, особенно при затуплении его по задней поверхности. Для точного определения составляющих сил резания P_z , P_y и P_x используют эмпирические уравнения, полученные экспериментальным путем.

Равнодействующая R является диагональю параллелепипеда. Следовательно,

$$R = \sqrt{P_z^2 + P_y^2 + P_x^2}, \text{ или } R \approx (1,1 \dots 1,2)P_z.$$

Угол ψ между силами R и P_x равен $25 \dots 40^\circ$.

Экспериментальными исследованиями установлено, что для всех составляющих сил резания P_z , P_y и P_x влияние глубины резания и подачи может быть выражено общей зависимостью

$$P = C_{pt}^{x_p} S^{y_p}.$$

С уменьшением отношения t/S степень влияния глубины резания на силу P_z уменьшается, а подачи — увеличивается.

Значения постоянных коэффициентов C_P и показателей степеней x_P и y_P зависят от свойств обрабатываемого металла, геометрических параметров режущей части резцов, условий смазывания, охлаждения зоны резания и т.д. В качестве примера приведем эмпирические формулы для определения составляющих сил резания при точении стали проходными твердосплавными резцами:

$$P_z = C_P t S^{0,75} v^{-0,15}; P_y = C_P t^{0,9} S^{0,6} v^{-0,3}; P_x = C_P t S^{0,5} v^{-0,4}.$$

При фасонном точении твердосплавными резцами $P_z = C_P B S^{0,75}$, а отрезными и прорезными — $P_z = C_P B S$ (B — длина кромки резца, находящейся непосредственно в работе).

Влияние свойств обрабатываемого материала на силы резания было рассмотрено в § 5.3. Чем выше твердость и прочность обрабатываемого материала, тем больше силы резания. Приведем их соотношения. Если $HВ'$ соответствует P' , а $HВ''$ — P'' , то

$$\frac{P'}{P''} = \left(\frac{HВ'}{HВ''} \right)^q; P' = P'' \left(\frac{HВ''}{HВ'} \right)^q.$$

По этим формулам можно определить любую силу резания при обработке стали с $HВ''$, если известна сила резания P' для стали с $HВ'$. Например, при обработке серого чугуна твердостью 190 $HВ$ сила $P'_z = 925$ Н. Требуется определить P''_z при обработке чугуна твердостью 241 $HВ$. Тогда $P''_z = 925(241/190)^{0,4} = 1018$ Н.

Что касается влияния на силы резания свойств материала инструмента, скорости резания, СОЖ, переднего и заднего углов, то выводы, сделанные для случая свободного резания, целиком применимы к точению различными резцами.

Рассмотрим влияние главного угла в плане ϕ на силу резания. По мере увеличения угла ϕ при обработке чугуна сила P_z уменьшается, а при обработке стали сначала уменьшается, а затем (при $\phi = 50^\circ$) возрастает (рис. 5.13). Такой характер зависимости $P_z = f(\phi)$ объясняется тем, что увеличение угла ϕ приводит к уменьшению ширины b и увеличению толщины a среза, хотя при этом глубина резания и подача остаются неизменными.

При уменьшении b и a уменьшается сила P_z . Кроме того, большему углу ϕ будет соответствовать большая длина криволинейной части главной режущей кромки $l_{к2} > l_{к1}$, что усложняет условия резания и способствует увеличению силы P_z (рис. 5.14, а, б); меньший угол γ'_2 будет в секущей плоскости $A-A$, в то время как перед-

ние углы γ_1 и γ_2 в главной режущей плоскости $N-N$ будут одинаковыми при различных углах ϕ (рис. 5.14, *в, з*), что также приводит к увеличению силы P_x .

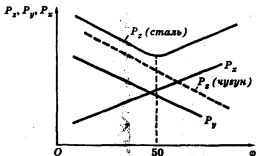


Рис. 5.13. Влияние главного угла в плане на силы резания P_z , P_y , P_x

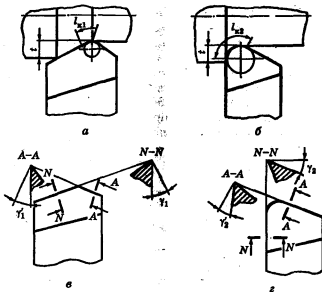


Рис. 5.14. Изменение криволинейной части режущей кромки резца и угла γ с изменением угла ϕ :

а, б — $r_{k2} > r_{k1}$; *в, з* — $\gamma_1 > \gamma_2$

Таким образом, увеличение угла φ оказывает сложное воздействие на силу P_x . При малых углах φ большее воздействие на силу P_x оказывает изменение ширины и толщины среза, а при работе резцами с $\varphi > 50^\circ$ преобладает влияние радиуса криволинейной части режущей кромки и значения угла γ_2 .

Влияние угла φ на силы P_y и P_x легко объясняется изменением соотношения сил, действующих в горизонтальной плоскости. Как видно из рис. 5.15, с увеличением угла φ сила P_x возрастает, а P_y уменьшается. При $\varphi = 90^\circ$ сила P_y незначительна.



Рис. 5.15. Влияние главного угла в плане на составляющие силы резания P_x и P_y при $\varphi_1 < \varphi_2 < \varphi_3$

Влияние вспомогательного угла в плане φ_1 и угла наклона главной режущей кромки λ на силы резания незначительно, поэтому оно практически не учитывается.

Увеличение радиуса вершины r_n , как и уменьшение главного угла в плане φ , изменяет условия резания (рис. 5.16), поскольку при неизменных значениях t и S растет ширина и уменьшается толщина среза. Кроме того, это приводит к увеличению деформации срезаемого металла и уменьшению вспомогательного переднего угла γ_1 .

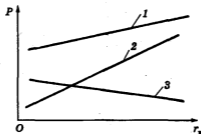


Рис. 5.16. Влияние радиуса сопряжения режущих кромок r_n на составляющие силы резания:

$$1 - P_x = C_{P_x} r_n^{0,1}; \quad 2 - P_y = C_{P_y} r_n^{0,25}; \quad 3 - P_x = C_{P_x} / r_n^{0,25}$$

Рассмотрев влияние различных факторов на силы резания, приведем обобщенные формулы для их расчета при точении:

$$P_z = C_{P_z} t^{x_{P_z}} S^{y_{P_z}} v^{z_{P_z}} K_{P_z};$$

$$P_y = C_{P_y} t^{x_{P_y}} S^{y_{P_y}} v^{z_{P_y}} K_{P_y};$$

$$P_x = C_{P_x} t^{x_{P_x}} S^{y_{P_x}} v^{z_{P_x}} K_{P_x},$$

где C_P — постоянная, характеризующая определенные условия резания для конкретной марки обрабатываемого материала, принятого за основу (эталон). Например, для точения твердосплавными резцами стали с $\sigma_b = 650$ МПа (180 НВ) $C_{P_z} \approx 2700$; для фасонных резцов из быстрорежущей стали $C_{P_z} \approx 1900$; для отрезных резцов $C_{P_z} \approx 2200$; для серого чугуна твердостью 190 НВ $C_{P_z} \approx 900$; $K_P = K_M K_{НВ} K_\phi K_T K_{СОЖ} K_A$ — поправочные коэффициенты, характеризующие влияние: K_M — группы обрабатываемого материала (сталь углеродистая, легированная и т.д.); $K_{НВ}$ (K_{σ_b}) — твердости (прочности) обрабатываемого материала; K_ϕ — главного угла в плане ϕ ; $K_{СОЖ}$ — смазочно-охлаждающей жидкости; K_A — износа резца и т.д.

Значения постоянных C_P , поправочных коэффициентов K и показателей степени x , y и z приводятся в специальных справочниках по режимам резания. Там же помещены таблицы, позволяющие определять силы резания при различных значениях глубины резания и подачи.

Силы резания и крутящий момент при сверлении. Предположим, что равнодействующая сил, возникающих на режущем лезвии сверла, приложена в точке A (рис. 5.17, а). Разложим ее в трех взаимно перпендикулярных направлениях и получим три составляющие силы, действующие на каждое лезвие. Силы P_z создают крутящий момент $M_{кр}$, который преодолевается шпинделем станка. Силы P_y действуют по радиусам и взаимно уничтожаются. Силы P_x вместе с силой P_n , действующей на перемычке, образуют осевую силу (или силу подачи) P_o , которая преодолевается механизмом подачи станка. В итоге на сверло действуют крутящий момент $M_{кр}$ и осевая сила, или сила подачи.

Определим крутящий момент теоретическим путем, учитывая, что фактически $M_{кр}$ создается элементарными силами, действующими на двух главных режущих лезвиях ab и ce , перемычке (рис. 5.17, б), а также силами трения, действующими на направляющих ленточках. При этом надо помнить, что значение $M_{кр}$ в основном определяется силами, действующими на главных режущих кромках.

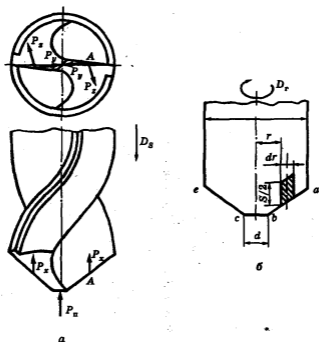


Рис. 5.17. Система сил, действующих на сверло (а), и расчетная схема для определения $M_{кр}$ при сверлении (б)

Выделим вдоль лезвия элементарную площадку среза, равную произведению $dr \cdot S/2$. На ней действует элементарный момент резания $dM = k_c dr \cdot S/2$ (k_c — удельная сила резания).

Известно, что удельная сила резания увеличивается с уменьшением площадки среза и может быть представлена в виде $k_c = A/S^\alpha$. Тогда с учетом зависимости $k_c = f(S)$

$$dM = k_c dr(S/2)r = AS^{\alpha-1}dr/2S^\alpha = BS^{1-\alpha}rdr;$$

$$M_{кр} = 2 \int_{d/2}^{D/2} BS^{1-\alpha}rdr = BS^{\alpha M} \frac{r^2}{2} \Big|_{d/2}^{D/2} = C_M S^{\alpha M} D^{\alpha M},$$

где A , $B = A/2$, $C_M = B/2$ — постоянные величины; d — диаметр сердцевины сверла; D — диаметр сверла; обычно $d \ll D$; $\alpha_M = 2$.

Принтегрируем элементарную осевую силу dP :

$$P = \int_{d/2}^{D/2} k_c \frac{S}{2} dr.$$

После преобразований получим:

$$P_o = C_P S^{y_P} D^{x_P}.$$

Эксперименты, проведенные с использованием динамометров при сверлении материалов сверлами разных диаметров и с различной подачей, позволили получить эмпирические формулы, которые хорошо согласуются с теоретическими и используются для подсчета $M_{кр}$ и P_o :

$$M_{кр} = C_M S^{y_M} D^{x_M} K_M; P_o = C_P S^{y_P} D^{x_P} K_P,$$

где C_M, C_P — коэффициенты, характеризующие условия сверления и свойства материала, принятого за эталон; K_M, K_P — общие поправочные коэффициенты на измененные условия работы (берутся из справочников).

Отметим в качестве примера, что при сверлении стали сверлом из быстрорежущей стали P9 $M_{кр} = 0,345D^2S^{0,3}$ Н·м, при сверлении чугуна $P_o = 570DS^{0,8}$ Н.

Резание при сверлении осуществляется пятью элементами сверла: двумя главными режущими кромками, перемычкой и двумя кромками направляющих ленточек. На каждый из этих элементов приходится определенная доля $M_{кр}$ и осевой силы P_o . Специальные исследования показывают, что между этими составляющими существуют примерно следующие соотношения:

1) по $M_{кр}$: на главные режущие кромки приходится 80 %, на перемычку — 8, на трение ленточек об обработанную поверхность и трение стружки о канавки сверла — 12 % общего $M_{кр}$;

2) по P_o : на режущие кромки — 40 %, на перемычку — 57, на трение ленточек об обработанную поверхность и стружки о канавки сверла — 3 % от общей силы P_o .

Геометрические параметры сверла оказывают существенное влияние на $M_{кр}$ и P_o . Так, с возрастанием угла наклона винтовой канавки ω (рис. 5.18, а) увеличивается передний угол γ , а значит, облегчается процесс стружкообразования и уменьшаются $M_{кр}$ и P_o . Такое снижение $M_{кр}$ и P_o особенно заметно при увеличении ω до 30°. Дальнейшее изменение ω не оказывает существенного влияния на $M_{кр}$ и P_o .

В зависимости от угла 2φ уровни $M_{кр}$ и P_0 изменяются, так как изменяются ширина и толщина среза (аналогично точению). С увеличением φ $M_{кр}$ уменьшается, а P_0 возрастает (рис. 5.18, б).

Длина k поперечной кромки оказывает большее влияние на P_0 , чем на $M_{кр}$ (рис. 5.18, в). Для уменьшения P_0 делают специальные подточки перемычки.

Влияние свойств обрабатываемого материала на практике учитывается, как и для точения, эмпирическими зависимостями:

$$M_{кр} = C_1 HB^{q_M}, \text{ или } M_{кр} = C_1^{\sigma} \sigma_B^{q_M};$$

$$P_0 = C_2 HB^{q_P}, \text{ или } P_0 = C_2^{\sigma} \sigma_B^{q_P}.$$

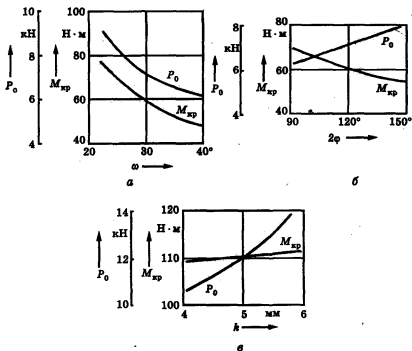


Рис. 5.18. Зависимость P_0 и $M_{кр}$ при сверлении от угла наклона винтовой канавки ω (а), угла при вершине 2φ (б) и длины поперечной кромки k (в)

Значения постоянных коэффициентов и показателей степеней приводятся в соответствующих справочниках и нормативах режимов резания.

Силы резания при фрезеровании. Силу R_1 , которая преодолевает сопротивление резанию, можно разложить на две составляющие: *окружную силу* P_x , действующую по касательной к траектории движения режущего лезвия, и *радиальную* P_y (рис. 5.19). Кроме того, эту же равнодействующую силу R_1 можно разложить на *горизонтальную* P_h и *вертикальную* P_v составляющие силы. Если же фреза имеет винтовые зубья, то наряду с силой R_1 , действующей на зуб в плоскости, перпендикулярной к оси фрезы, возникает *осевая сила* P_x . Общей равнодействующей в этом случае будет сила $R = \sqrt{P_x^2 + R_1^2}$.

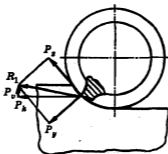


Рис. 5.19. Схема сил резания, действующих на зубья цилиндрических фрез

Силой P_x определяется основная работа по срезанию стружки. По ней подсчитывается эффективная мощность и выполняется расчет деталей механизма главного движения. Радиальная сила P_y оказывает давление на подшипники шпинделя и изгибает оправку фрезы. По горизонтальной силе P_h , называемой иначе *силой подачи*, рассчитывают детали механизма подачи и приспособления для закрепления заготовки. Эта сила может вызвать вибрации при наличии люфтов в паре винт — гайка. Вертикальная сила P_v стремится при встречном фрезеровании оторвать заготовку от стола и приподнять стол над направляющими станины.

Формулы для подсчета окружной силы (в ньютонах) и мощности (в киловаттах) при фрезеровании приведены в справочниках

режимов резания [9]. Например, для цилиндрических, концевых, дисковых, прорезных фрез из быстрорежущей стали при обработке конструкционной стали 215 НВ ($\sigma_s=750$ МПа)

$$P_z = 682t^{0,86}S_z^{0,72}BzD^{-0,86}.$$

Анализ эмпирических зависимостей для случая обработки цилиндрическими фрезами позволяет сделать следующие выводы:

1) сила резания P_z прямо пропорциональна ширине фрезерования B и числу зубьев фрезы z ;

2) влияние подачи на силу резания характеризуется, как и при точении, показателем степени, близким к 0,75;

3) показатель степени при t меньше единицы, в то время как при точении $x_p = 1$. Это объясняется тем, что глубины резания при фрезеровании и точении являются в сущности разными параметрами. Если при точении глубина резания t характеризует ширину среза, то при фрезеровании она определяет угол контакта δ , а также срединную толщину срезаемого слоя. Поэтому с увеличением t уменьшается удельная сила резания;

4) с увеличением диаметра D фрезы сила резания становится меньше, так как при этом уменьшается число одновременно работающих зубьев при постоянных z , t и B . Действительно, с увеличением D полный угол контакта δ уменьшается, а угол между зубьями $\eta = 360^\circ/z$ остается постоянным, а значит, уменьшается и число одновременно работающих зубьев; с увеличением D уменьшается толщина среза, а следовательно, и площадь поперечного сечения среза и сила резания. Напомним, что $a_{\max} = S_z \sin \delta$. Но при большем диаметре фрезы полный угол контакта δ будет меньшим, а значит, и a_{\max} уменьшается.

Другие составляющие сил резания при фрезеровании обычно определяются не эмпирическими формулами, а по соотношениям, связывающим их с окружной силой P_z . Для встречного фрезерования цилиндрической фрезой с прямыми зубьями эти соотношения имеют следующие значения [9]: $P_y = (0,4...0,6)P_z$; $P_h = (1,1...1,2)P_z$; $P_v = (0,2...0,3)P_z$; для попутного фрезерования: $P_y = (0,4...0,6)P_z$; $P_h = (0,8...0,9)P_z$; $P_v = (0,7...0,9)P_z$. Для симметричного торцового фрезерования $P_h = (0,3...0,4)P_z$. Для фрез с винтовыми зубьями необходимо учитывать еще действие осевой силы P_x , зависящей от угла ω и равной примерно $(0,35...0,55)P_z$. Действие осевых сил желательнее устранять. Достигается это за счет применения сдвоенных фрез с разнонаправленными винтовыми зубьями (рис. 5.20).

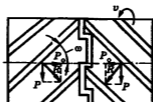


Рис. 5.20. Схема действия сил резания на составную цилиндрическую фрезу

Значительное влияние на силы резания оказывает передний угол γ зубьев фрезы и угол в плане ϕ . Чем больше γ , тем меньше P_z . Опытным путем установлено, что увеличение переднего угла γ на 1° уменьшает силу P_z на 1,0...1,5 %. Если принять для цилиндрических и торцовых фрез при $\gamma = 10^\circ P_z = 1,0$, то при $\gamma = -10; 0; 20^\circ$ соответственно $P_z = 1,26; 1,12; 0,87$.

Влияние угла в плане ϕ на P_z при торцовом фрезеровании более сложное, чем влияние угла γ . Сила P_z растет и при малых, и при больших значениях угла ϕ . Так, если принять при $\phi = 60^\circ P_z = 1$, то при $\phi = 45; 90; 30^\circ$ соответственно $P_z = 1,06; 1,14; 1,15$. Объясняется это тем, что при различных углах ϕ изменяются толщина и ширина среза, направление схода стружки и другие условия резания, в результате суммарного действия которых наблюдается указанное изменение силы P_z .

Работа и мощность резания

5.5. при различных видах обработки

В общем случае работа резания (в джоулях)

$$W = P_z L,$$

где P_z — сила резания, действующая в направлении скорости резания, Н; L — путь, проходимый режущим инструментом, м.

В общей работе резания на долю деформации, трения по передней и задней поверхностям приходится соответственно 55, 35 и 10 %. Если известен путь, пройденный инструментом за 1 мин, получим работу, выполненную за это время:

$$W = P_z v = P_c v_c + F_n v_n + F_s v_s,$$

где v — скорость резания, м/мин; P_c — сила сдвига, или сила в плоскости сдвига, Н; v_c — скорость сдвига, м/мин; F_n — сила трения по передней поверхности лезвия инструмента, Н; v_n — скорость движения стружки по передней поверхности лезвия, м/мин; $v_n = v/K_f$; F_s — сила трения по задней поверхности лезвия инструмента, Н; v_s — скорость движения обработанной поверхности относительно задней поверхности лезвия инструмента, м/мин: $v_s = v$.

Зная силы резания, можно также определить мощность (в киловаттах), необходимую для резания. Ее называют *эффективной*, так как она не включает затраты мощности на преодоление сил трения в механизмах станка.

При точении

$$N_p = N_p + N_{p_y} + N_{p_x},$$

или

$$N_p = \frac{P_z v_z}{60 \cdot 10^3} + \frac{P_y v_y}{60 \cdot 10^3} + \frac{P_x v_x}{60 \cdot 10^3},$$

где P_z, P_y, P_x — силы резания, Н; v_z — скорость резания, м/мин: $v_z = v$; $v_y = 0$ — скорость перемещения резца в радиальном направлении, м/мин; v_x — скорость подачи, м/мин.

Так как v_x очень мала по сравнению со скоростью резания, третьим слагаемым при подсчете N_p можно пренебречь. Например, при точении с $v = 30$ м/мин, $S = 0,3$ мм/об и $n = 800$ об/мин $v_x = 0,24$ м/мин. Тогда $N_p = P_z v / (60 \cdot 10^3)$.

Определив эффективную мощность N_p , можно найти потребную мощность электродвигателя станка:

$$N_{дв} = \frac{P_z v}{60 \cdot 10^3 \eta_{ст} K_n},$$

где $\eta_{ст}$ — КПД станка; K_n — коэффициент допустимой кратковременной перегрузки. В большинстве случаев $K_n = 1,3 \dots 1,5$, а иногда $K_n = 2$.

При сверлении, зная крутящий момент и осевую силу, можно определить мощность, потребную на процесс сверления:

$$N_p = N_{кр} + N_S = \frac{M_{кр} n}{9750} + \frac{P_o S n}{60 \cdot 10^3},$$

где $N_{кр}, N_S$ — мощность, потребная соответственно на вращение сверла и подачу.

Так как $N_S = (0,5...1,5) \%$ от $N_{кр}$, можно записать: $N_p = M_{кр}n/9750$.

С учетом КПД станка $\eta_{ст}$ и коэффициента допустимой перегрузки, равного примерно 1,3, окончательно $N_{дв} = N_p / (1,3\eta_{ст})$.

При фрезеровании, зная значения P_z и v , можно рассчитать мощность, затрачиваемую на фрезерование:

$$N_p = P_z v = C_{Nt} t^{x_2} S_2^{y_2} B z n D^{q_N}.$$

Мощность, затрачиваемая на подачу, составляет не более 15 % от мощности резания. Поэтому полная расчетная мощность

$$N_{дв} = 1,15 N_p / (\eta_{ст} K_n),$$

где $\eta_{ст}$ — КПД станка; K_n — коэффициент допустимой кратковременной перегрузки: $K_n = 1,3...1,5$.

Для цилиндрических, концевых, дисковых, прорезных фрез из быстрорежущей стали при обработке конструкционной стали 215 НВ

$$N_p = 3,5 \cdot 10^{-5} t^{0,86} S_2^{0,72} B z n D^{0,14}.$$

Для торцовых твердосплавных фрез при фрезеровании серого чугуна твердостью 190 НВ

$$N_p = 2,8 \cdot 10^{-5} t^{0,9} S_2^{0,74} B z n D^{0,17}.$$

Одним из показателей рационального осуществления обработки является также *удельная работа резания* a_p (отношение работы резания W к объему снятого металла). Удельная работа резания зависит от режимов резания и геометрии инструмента: чем больше скорость резания, толщина среза и передний угол, тем меньше a_p .

В зависимости от способа обработки удельная работа резания колеблется в широких пределах (табл. 5.2).

Таблица 5.2

Основные технические показатели различных видов обработки [7]

Способ обработки	Площадь сечения срезаемого слоя, мм ²	Удельная работа резания, кДж/см ³	Скорость резания, м/с	Производительность, см ³ /с
Точение	1,0	0,5...0,7	1,5...7,5	0,05...50
Протягивание	0,5	2,5...3,7	0,01...1,0	0,004...0,1
Фрезерование	0,3	5,0...7,5	2...6	0,002...1,0
Развертывание	0,1	12...30	0,15...1,6	0,005...0,5
Шлифование	0,00005	55...70	25...50	0,005...0,02

Вибрации в технологических станочных системах

5.6.

В процессе резания в ячейках технологической системы могут возникать колебания, называемые *вибрациями*. *Технологическая система* в общем случае представляет собой совокупность функционально взаимосвязанных средств технологического оснащения, предметов производства и исполнителей, предназначенная для выполнения того или иного технологического процесса или операции. Технологическая станочная система может служить для обработки конкретной поверхности детали или как одна из многих подсистем входить в общую систему для обработки детали, а в дальнейшем — сборки машины. Раскрытие физических причин возмущения колебаний при резании металлов с самого начала развития науки о резании привлекало внимание исследователей. Практика показала, что при различных условиях обработки могут появляться колебания детали, оборудования и инструмента разной частоты. Чаще всего деталь имеет низкочастотные колебания, а инструмент — высокочастотные. При возникновении вибраций снижаются качество обработанной поверхности и период стойкости инструмента.

В ходе работы станка возникает несколько различных видов колебаний — вынужденные, параметрические, релаксационные и самовозбуждающиеся, или автоколебания.

Вынужденные колебания возникают вследствие наличия в системе внешней периодической силы, вызывающей колебательный процесс с частотой, равной частоте возмущающей силы. Причиной появления возмущающей силы могут быть силы, обусловленные процессом резания (прерывистость процесса резания, неравномерность припуска, оставленного на обработку), а также силы, возникающие в ячейке технологической системы вне зоны резания (дисбаланс вращающихся частей станка, детали и инструмента, дефекты зубчатых и ременных передач станка, передача колебаний станку от других работающих поблизости станков и т.д.) [5]. Для устранения этих колебаний достаточно ликвидировать причины их возникновения.

Параметрические колебания возникают при наличии какого-либо переменного параметра, создающего эффект, аналогичный действию переменной силы. Обычно таким параметром является переменная жесткость узла или детали. Например, наличие шпо-

ночной канавки на валу или переменная жесткость подшипников качения (рис. 5.21) приводит к тому, что при вращении прогибы вала периодически изменяются, хотя внешняя сила постоянна. Параметрические колебания вследствие переменной жесткости по характеру близки к вынужденным.

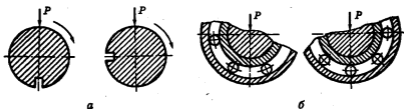


Рис. 5.21. Изменение жесткости вала со шпоночным пазом (а) и подшипника качения (б)

Релаксационные (прерывистые) колебания возникают при медленных перемещениях узлов станочной системы. Рассмотрим механизм их появления (рис. 5.22). При малой равномерной скорости перемещения v_0 ведущего звена 1 сначала происходит деформация передаточного звена 2 без движения ведомого звена 3, пока не будет преодолена сила сопротивления. Как только начнется движение, сила трения резко падает, так как она меньше силы трения покоя. При этом ведомое звено под действием потенциальной энергии передаточного звена получит перемещение с переменной скоростью v и остановится. Далее циклы скачков повторяются. Релаксационные колебания, приводя к неустойчивому перемещению узлов, могут вызвать значительные динамические нагрузки на узлы станка и режущий инструмент, а также погрешности при обработке деталей.

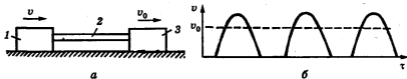


Рис. 5.22. Схема возникновения релаксационных колебаний (а) и изменение скорости перемещений узла станка во времени (б)

Наиболее характерной формой колебаний являются **автоколебания**. Они возникают при всех известных видах обработки. Любое

случайное возмущение (толчок), каких много в реальной системе резания (вход или выход режущих лезвий из контакта с деталью, неравномерность припуска, неоднородность свойств обрабатываемого материала, радиальное биение заготовки или инструмента и др.), приводит к возникновению собственных затухающих колебаний системы. Эти колебания всегда сопровождаются изменением среза (обычно только толщины среза a) и скорости резания v или скорости скольжения стружки по передней поверхности инструмента. Изменение a и v вызывает соответствующее изменение силы резания и ее составляющих. В определенных условиях возникшие колебания могут перейти в незатухающие автоколебания. Энергию для их поддержания создает переменная сила резания [2, 5].

В реальной упругой системе в процессе резания может существовать много причин, вызывающих автоколебательный процесс. Наиболее существенно влияние первичных механизмов возмущения автоколебаний, вызванных координатной связью технологической системы станок — приспособление — инструмент — деталь (СПИД), имеющей несколько степеней свободы, с процессом резания и специфической зависимостью силы резания от его скорости. Первичный механизм возбуждения автоколебаний вследствие действия координатной связи системы, имеющей несколько степеней свободы, представлен в работе [5].

Наличие большого количества степеней свободы в системе приводит к тому, что колебания инструмента относительно заготовки представляют собой результат сложения нескольких связанных между собой поступательных или крутильных колебаний. В системе с двумя степенями свободы складываются два поступательных колебательных движения по осям φ и ψ (рис. 5.23, а). Между этими колебаниями существует тот или иной сдвиг по времени. Поэтому результирующая траектория относительного движения инструмента и заготовки имеет форму замкнутой кривой (теоретически — эллипса). Движение инструмента по траектории 1 — 2 — 3 — 4 — 5 — 6 изменяет толщину среза, а следовательно, и силу резания так, что при движении в сторону действия силы резания толщина срезаемого слоя больше, чем при движении инструмента навстречу силе резания (рис. 5.23, б). При этом в положениях 1, 2 и 3 направление колебаний совпадает с силой P_z , а в положениях 4, 5, 6 — противоположно ей. Так как на пути 1 — 2 — 3 сила резания в среднем больше, чем на пути 4 — 5 — 6, она совершает некоторую положительную работу, поддерживающую колебательный процесс. Эта работа характеризуется площадью диаграммы сила резания — перемеще-

ние резца (рис. 5.23, в). Вибрации нарастают до тех пор, пока не устанавливаются стабильные автоколебания с частотой, определяемой свойствами системы СПИД.

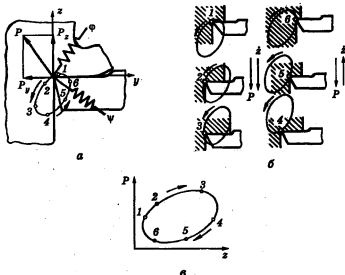


Рис. 5.23. Траектория относительного движения инструмента и заготовки при автоколебаниях и диаграмма работы резания

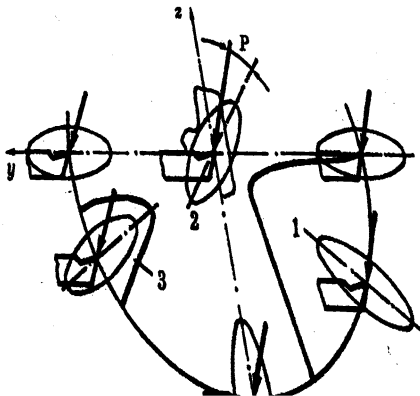
Возникновению автоколебаний дополнительно способствует отставание изменения силы резания от толщины среза. Такое отставание наблюдается при обработке самых различных материалов. В диапазоне режимов резания, в котором работают быстрорежущие и твердосплавные инструменты, оно находится в пределах 3...5 мкс [2], и его можно определить по эмпирической формуле $\Delta\tau = -1 + 2,6K_a$ (K_a — коэффициент утолщения стружки). При $a = \text{const}$ условию равновесия системы соответствует определенная и постоянная сила резания. Зона вторичной деформации стружки, прилегающая к зоне пластического контакта C_n , формируется не мгновенно, и для установления равновесия сил требуется некоторое время. Если автоколебательную систему случайно вывести из равновесия, мгновенная толщина среза будет непрерывно периодически изменяться и установление равновесного состояния не успеет за этим изменением. При увеличении a ширина площадки контакта C_n бу-

дет несколько меньше, а при уменьшении — несколько больше, чем для случая $a = \text{const}$. Поскольку $P_y = f(a)$, при врезании мгновенная сила P_y будет несколько меньше, а при отгаливании — несколько больше мгновенной силы при $a = \text{const}$.

В зависимости от положения осей жесткости системы СПИД возможны три состояния технологической системы: устойчивый процесс резания, автоколебательные процессы при резании и подрывание (рис. 5.24). В широком диапазоне условий резания существуют такие их сочетания, при которых процесс всегда будет устойчивым, и такие, когда возможно возникновение автоколебаний. В работе [12] предложено уравнение для расчета граничного значения ширины среза, при котором процесс оказывается неустойчивым:

$$b_{\text{крmin}} = \frac{k\omega}{C_{P_x} y_{P_x} a^{y_{P_x}-1} \sin \varphi}; \quad \varphi = 2 \arctg \left[\frac{c(\omega/\omega_0 - 1)}{k\omega} \right],$$

где k — обобщенный коэффициент демпфирования колебаний; ω — частота колебаний системы в процессе резания; ω_0 — частота собственных колебаний системы; C_{P_x}, y_{P_x} — соответственно коэффициент и показатель степени в формуле для расчета осевой силы; a — толщина срезаемого слоя; φ — угол фазового смещения; c — обобщенный коэффициент жесткости системы.



Расчеты показывают, что при точении можно выделить четыре возможные области работы (рис. 5.25):

- 1) область *A* устойчивого точения;
- 2) область *B* условно устойчивого точения (для конкретных условий резания);
- 3) область *C* неустойчивого точения с постоянной частотой автоколебаний;
- 4) область *D* неустойчивого точения с наложением частот колебаний.

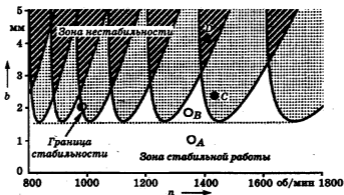


Рис. 5.25. Зависимость граничного значения ширины среза от частоты вращения шпинделя [12]

Аналогичные результаты получены для случая цилиндрического фрезерования (рис. 5.26), однако там имеют место сочетания условий резания, при которых процесс всегда остается устойчивым.

Подрывание является следствием аperiodической неустойчивости динамической системы станка. В этом случае в результате случайного толчка возникает нарастающее в одном направлении отклонение инструмента. Он все глубже врезается в металл, и в итоге происходит поломка инструмента или обрабатываемой детали (рис. 5.27).

Возникновению автоколебаний способствует также изменение силы трения стружки о переднюю поверхность инструмента и обрабатываемой детали о заднюю. Известно, что при высоких скоростях резания силы трения уменьшаются по мере роста скорости (см. § 4.2). Случайное ускорение скольжения в этом случае снижает силу трения и ведет к дальнейшему возрастанию ускорения до

тех пор, пока система не перейдет по инерции в положение, при котором упругие внешние связи разовьют силу, вызывающую замедление скольжения. Описанное явление характерно для автоколебательных процессов, протекающих со значительными амплитудами.

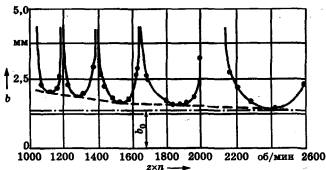


Рис. 5.26. Влияние условий цилиндрического фрезерования на граничное значение ширины фрезерования ($S_0 = 0,79$ мм/об; $t = 5,24$ мм) [10]



Рис. 5.27. Стружка, образовавшаяся в результате подрывания отрезного резца

Резание по следу предыдущего вибрационного прохода инструмента (рис. 5.28) вызывает вторичное усиление рабочих углов резания из-за изменения толщины среза и фактических рабочих углов резания при колебаниях инструмента. В случае, если энергия возмущения колебаний меньше энергии сопротивления системы, вибрации от-

сутствуют. В противном случае процесс резания по следу обработки вызывает вынужденные колебания с резонансной частотой, равной частоте собственных колебаний системы. Поскольку практически все реальные процессы резания осуществляются при работе по следу, вторичное возбуждение усиливает интенсивность автоколебаний. Так называемые установившиеся автоколебания наступают после 5–30 оборотов для однолезвийных инструментов или после прохода 8–20 зубьев для многолезвийных инструментов [2].



Рис. 5.28. Схема резания по следу предыдущего прохода

Кроме рассмотренных основных причин возбуждения автоколебаний существует еще ряд второстепенных, менее значительных, которые проявляются только в строго определенных условиях. К ним относятся изменения рабочих углов инструмента при колебаниях, а также поперечного сечения среза при упругом закручивании сверл, зенкеров, метчиков и других стержневых инструментов.

На колебания в некоторой степени влияет и собственная неустойчивость процесса резания: периодические срывы наростов, образование и скалывание элементов стружки, схватывание и налипание обрабатываемого материала по задним поверхностям инструмента и другие явления, сопровождающие процесс резания. Однако частота всех этих явлений существенно отличается от частоты автоколебаний, которая всегда близка к собственной частоте доминирующей колебательной системы. Поэтому указанные физические явления не могут служить причинами возбуждения и поддержания автоколебаний [2].

Физическая модель возникновения и развития установившейся формы автоколебаний при резании лезвийным инструментом может быть следующей:

1) любые случайные толчки выводят упругую систему из равновесия и приводят к изменению толщины среза;

2) отставание изменения силы резания от изменения толщины среза переводит возникшие собственные затухающие колебания в незатухающие автоколебания, где поддерживающую их энергию создает изменяющаяся синхронно, но сдвинутая по фазе сила резания;

3) возникающие на поверхности резания вибрационные следы, начиная со второго оборота детали при точении или с работы второго зуба многолезвийного инструмента, будут при каждом колебании генерировать в системе дополнительную энергию;

4) через определенный промежуток времени наступает равновесие между энергией возбуждения, поступающей в систему, и энергией, рассеиваемой при колебаниях, и устанавливается определенный уровень автоколебаний.

Условия возникновения колебаний в зоне резания можно анализировать на основе экспериментальных исследований и численных математических моделей. При разработке модели принимается, что в процессе резания наиболее интенсивные колебания возникают только в одном из элементов технологической системы — инструменте или детали. Так, при точении консольно закрепленного вала колебания с наибольшей амплитудой имеет деталь (вал), при сверлении или фрезеровании концевыми фрезами — инструмент (как вал переменной жесткости), при растачивании — также инструмент (оправка, борштанга).

Для анализа упругих систем, совершающих поперечные колебания, можно использовать схему (рис. 5.29), в которой действуют силы инерции $F_{иx}$, сопротивления (демпфирования) $F_{дx}$, упругости F_y и резания P . При этом в большинстве реальных технологических систем доминирующими являются поперечные колебания в плос-

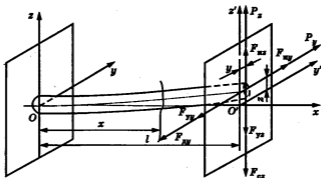


Рис. 5.29. Схема к моделированию колебаний консольно закрепленного вала при продольном точении

кости yOz , в которой действуют главная сила резания P_z и радиальная сила P_y , поскольку жесткость системы вдоль оси x значительно больше, а уровень осевой силы P_x — ниже.

Моделирование на ЭВМ колебаний консольно закрепленного вала согласно методике, изложенной в книге [2], позволило получить виброграммы, типовые формы которых приведены на рис. 5.30.

Аналогичная модель была разработана также для случая встречного фрезерования пазов двузубой пальцевой фрезой. Анализируя характер полученных виброграмм (рис. 5.31), можно выделить следующие случаи:

1) неустойчивый характер фрезерования, когда вследствие малой начальной толщины среза требуется определенное время для реального начала фрезерования;

2) установившийся характер колебаний, имеющих одновременно две гармоники — низкочастотную (вследствие изменения толщины среза) и высокочастотную, свидетельствующую о возникновении автоколебаний;

3) преобладание автоколебаний.

На амплитуду колебаний оказывает влияние ряд факторов. Увеличение толщины срезаемого слоя или подачи уменьшает амплитуду колебаний, увеличение ширины срезаемого слоя или глубины резания — увеличивает ее (рис. 5.32).

Влияние скорости резания на амплитуду колебаний имеет экстремальный характер (рис. 5.33). Максимальная амплитуда зависит от рода обрабатываемого материала и условий работы. Интенсивность вибраций зависит от переднего угла инструмента. При отрицательных его значениях амплитуда колебаний резко возрастает. Чем меньше γ , тем больше зона скоростей, при которых возникают вибрации. Уменьшение заднего угла инструмента до 3° и ниже приводит к снижению амплитуды колебаний, а если он больше $8...10^\circ$, то не оказывает существенного влияния на интенсивность колебаний.

С изменением угла ϕ изменяется толщина и ширина срезаемого слоя, а вследствие этого — амплитуда колебаний. С увеличением ϕ амплитуда колебаний уменьшается (рис. 5.34), поскольку при этом уменьшается b и увеличивается a . Частота автоколебаний не зависит ни от угла в плане, ни от толщины среза.

Автоколебательный процесс оказывает существенное влияние на протекание процесса резания. В частности, интенсивность изнашивания и период стойкости инструмента существенно зависят от амплитуды колебаний, в то время как влияние частоты на эти па-

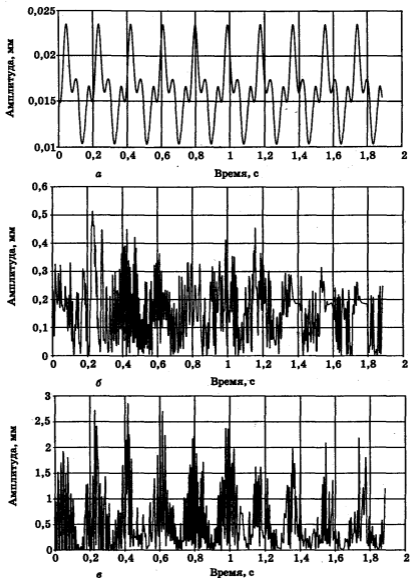


Рис. 5.30. Результаты моделирования колебательных процессов при точении: *a* — стабильное резание; *б* — возникновение автоколебаний; *в* — подрывание

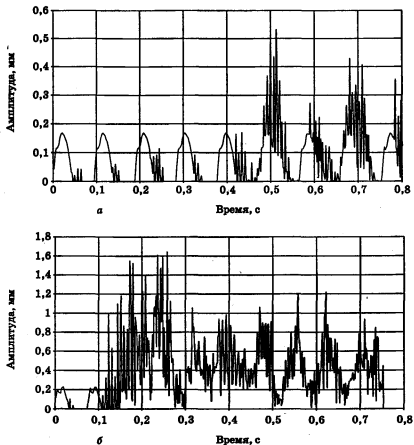


Рис. 5.31. Результаты моделирования колебательных процессов при фрезеровании двузубой фрезой: а — неустановившийся процесс; б — установившийся процесс

раметры значительно меньше. Зависимость $T = f(A)$ хорошо аппроксимируется уравнениями вида [2]

$$T = JA^m e^{-nA},$$

где J , m , n — постоянные, зависящие соответственно от свойств обрабатываемого и инструментального материалов и условий резания; A — амплитуда автоколебаний.

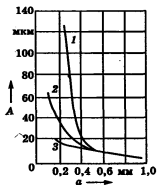


Рис. 5.32. Влияние толщины срезаемого слоя на амплитуду колебаний при точении:
 $1 - b = 6$ мм; $2 - b = 4,7$ мм; $3 - b = 3,7$ мм

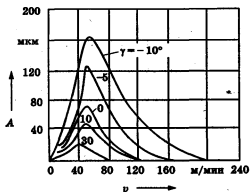


Рис. 5.33. Влияние скорости резания и переднего угла реза на амплитуду колебаний при точении

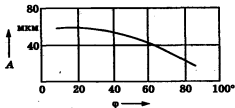


Рис. 5.34. Влияние главного угла в плане на амплитуду колебаний при точении

Так, например, при фрезеровании титанового сплава BT20 концевыми фрезами из твердого сплава BK8 $J = 79,5$, $m = 0,391$, $n = 0,0298$ [2].

Серьезной проблемой является борьба с вибрациями при резании. Для устранения их необходимо:

□ повышать виброустойчивость и динамические характеристики металлорежущих станков и их узлов [5, 8]. Проблема ликвидации вибраций становится особенно важной при проектировании приводов главного движения и движения подачи станков с ЧПУ. Это вызвано спецификой такого рода оборудования, где управляющий сигнал должен обеспечивать крайне малое перемещение исполнительного механизма. Чувствительность к сигналу в настоящее время достигает 1 мкм и менее. Возникновение колебаний, особенно релаксационных, нарушает взаимодействие управляющего и исполнительного элементов, что, в свою очередь, нарушает структурный принцип ЧПУ и является недопустимым;

□ разрабатывать применительно к конкретным технологическим операциям специальные виброгасящие устройства различных принципов действия (ударного, фрикционного, гидравлического и др.). Применение виброгасителей существенно снижает интенсивность автоколебаний при точении, растачивании, развертывании, фрезеровании;

□ разрабатывать виброустойчивые конструкции режущего и вспомогательного инструментов и оснастки, выбирать виброустойчивые диапазоны режимов резания. Эти работы приобретают особое значение в связи с возрастающим использованием многооперационных станков с ЧПУ и гибких производственных модулей;

□ исследовать и разрабатывать методы и средства управления уровнем интенсивности автоколебаний в целях повышения периода стойкости инструмента, производительности и качества обработки [2, 6, 7];

□ контролировать техническое состояние оборудования.

Литература

1. Гордон М.Б. Исследование трения и смазки при резании металлов / М.Б. Гордон // Трение и смазка при резании металлов. Чебоксары: ЧГУ, 1972. С. 7-137.
2. Жарков И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом / И.Г. Жарков. Л.: Машиностроение, 1986.

3. Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов / Н.Н. Зорев. М.: Машгиз, 1956.
4. Клушин М.И. Резание металлов / М.И. Клушин. М.: Машгиз, 1958.
5. Кудинов В.А. Динамика станков / В.А. Кудинов. М.: Машиностроение, 1967.
6. Подураев В.Н. Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания / В.Н. Подураев. М.: Машиностроение, 1977.
7. Подураев В.Н. Технология физико-химических методов обработки / В.Н. Подураев. М.: Машиностроение, 1985.
8. Пуш В.З. Автоматические станочные системы / В.З. Пуш, Р. Пигерт, В.Л. Сосонкин. М.: Машиностроение, 1982.
9. Справочник технолога-машиностроителя: В 2 т. / Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. М.: Машиностроение, 1986. Т. 2.
10. Boothroyd G. Fundamentals of machining and machine tools / G. Boothroyd, W.A. Knight. N.-Y.: Marcel Dekker, 1998.
11. Handbuch der Fertigungstechnik / Her. von G.Spur und T. Stöferle. Band 3/1. Spanen. München; Wien: Carl Hanser Verlag, 1979.
12. Jemielniak K. Obróbka skrawaniem / K. Jemielniak. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 1998.

Баланс теплоты при резании металлов.

6.1. Законы распределения температур

В процессе резания важную роль играют тепловые явления. Именно они определяют температуру в зоне резания, которая оказывает прямое воздействие на характер образования стружки, нарост, усадку стружки, силы резания и микроструктуру поверхностного слоя. Еще более существенно воздействует температура резания Θ на интенсивность затупления инструмента и период его стойкости.

Выделение теплоты при снятии стружки объясняется тем, что в теплоту преобразуется механическая работа, затраченная на срезание стружки:

$$W = W_{\text{деф}} + W_{\text{т.п.п}} + W_{\text{т.з.п}}$$

где $W_{\text{деф}}$, $W_{\text{т.п.п}}$, $W_{\text{т.з.п}}$ — работа, затрачиваемая соответственно на упругую и пластическую деформации срезаемого слоя, на преодоление сил трения по передней и задней поверхностям.

Практически в теплоту переходит вся работа резания (более 99,5 %). Пути распространения тепловых потоков без учета искусственного охлаждения инструмента и детали приведены на рис. 6.1, а. Как видно, при резании наблюдается сложное переплетение тепловых потоков, поскольку теплота от каждого из трех основных источников распределяется всем телам, участвующим в резании. Эту схему можно значительно упростить (рис. 6.1, б), введя понятие итоговых тепловых потоков, проходящих через контактные площадки.

Зная количество теплоты, выделяемой в процессе резания и распространяемой между стружкой, обрабатываемой деталью, инструментом и средой, можно записать уравнение баланса тепловой и механической энергии при резании:

$$W_{\text{деф}} + W_{\text{т.п.п}} + W_{\text{т.з.п}} = Q_c + Q_n + Q_d + Q_{\text{о.с.}}$$

где $Q_c + Q_n + Q_d + Q_{\text{о.с.}}$ — количество теплоты, переходящей соответственно в стружку, инструмент, деталь и окружающую среду.

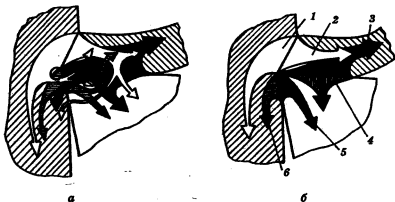


Рис. 6.1. Схемы движения тепловых потоков:

1 — доля теплоты деформации $Q_{\text{деф. д}}$, уходящая в деталь; 2 — доля теплоты деформации $Q_{\text{деф. с}}$, уходящая в стружку; 3 — количество теплоты $Q_{\text{т. л}}$, возникающей в результате трения между стружкой и передней поверхностью инструмента; 4 — итоговый поток теплоты $Q_{\text{н}}$, возникающей в результате теплообмена на площадке контакта надрезочной стороны стружки с передней поверхностью инструмента; 5 — итоговый поток теплоты $Q_{\text{д}}$, возникающей в результате теплообмена на площадке контакта поверхности резания с задней поверхностью инструмента; 6 — количество теплоты $Q_{\text{т. з}}$, возникающей в результате трения между деталью и задней поверхностью инструмента

Эксперименты показывают, что при резании с небольшой скоростью (до 30...40 м/мин) относительное количество теплоты составляет: $Q_{\text{с}}$ — 60...70 %, $Q_{\text{н}}$ — 3 %, $Q_{\text{д}}$ — 30...40 %, $Q_{\text{о.с}}$ — 1...2 %. Установлено, что чем ниже теплопроводность обрабатываемого материала, тем большее количество теплоты уходит в инструмент (табл. 6.1). По мере увеличения скорости резания значительно возрастает относительное количество теплоты, уходящей в стружку. Из опытов известно, что при скорости $v = 400...500$ м/мин теплота распределяется так: $Q_{\text{с}} \approx 97...98$ %, а $Q_{\text{н}} \approx 3$ %.

Использование технологических сред позволяет значительно повысить $Q_{\text{о.с}}$ в общем тепловом балансе. В зависимости от условий подвода среды уменьшаются $Q_{\text{н}}$, $Q_{\text{с}}$ и $Q_{\text{д}}$.

Зная величину и направление итоговых тепловых потоков, можно расчетным путем установить законы распределения температур на контактных площадках (рис. 6.2). Из рисунка видно, что различные места стружки нагреты неравномерно. Наибольшее коли-

чество теплоты концентрируется в тонких слоях стружки, прилегающих к передней поверхности. Здесь температура намного превышает температуру в зоне сдвига. По мере удаления от передней поверхности резца температура слоев стружки резко падает. В прирезочном слое максимальная температура наблюдается в середине длины площадки контакта. От этой области температура убывает по направлению как к режущей кромке, так и к точке отрыва стружки от передней поверхности. Температура обрабатываемого материала, лежащего ниже поверхности резания, значительно меньше температуры в стружке и на плоскости сдвига.

Таблица 6.1

Распределение теплоты между стружкой, деталью и режущим инструментом при точении твердосплавными резцами

Обрабатываемый материал	Режим резания	Количество теплоты, %		
		Q_c	Q_d	Q_n
Алюминий	$v = 100$ м/мин, $S = 0,12$ мм/об, $t = 1,5$ мм	21	73	2,2
Чугун	То же	42	50	1,5
Сталь 40Х	*	71	26	1,9
Сталь 45	$v = 30$ м/мин, $S = 0,3$ мм/об, $t = 4$ мм	69,2	27,4	3,4
Титановый сплав	$v = 35$ м/мин, $S = 0,3$ мм/об, $t = 4$ мм	73,4	16,8	9,8
Спеченная сталь	$v = 100$ м/мин, $S = 0,08$ мм/об, $t = 0,1$ мм	55	28	17*

* Использовался резец из композита 10 с теплопроводностью большей, чем у твердых сплавов.

Режущее лезвие также нагревается неравномерно. Сильнее всего разогрет участок передней поверхности, расположенный в середине длины площадки контакта, тогда как у вершины уровень температур меньше. По мере удаления от передней поверхности температура в режущем лезвии изменяется гораздо менее значительно, чем температура стружки.

Уровень и распределение температур в значительной степени определяются теплофизическими характеристиками обрабатываемого и инструментального материалов. Так, при повышении коэффициента теплопроводности инструментального материала температуры на передней поверхности уменьшаются, а на задней — увеличиваются. При повышении коэффициента теплопроводности обрабатываемого материала температуры снижаются. При работе

с малыми сечениями среза интенсифицируется тепловой поток со стороны задней поверхности и температура на задней поверхности существенно возрастает.

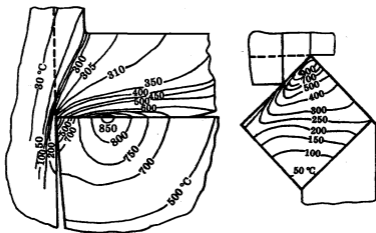


Рис. 6.2. Температурные поля в стружке, детали и резце при точении стали 3Х15 резцом из твердого сплава Т14К8 ($v = 80$ м/мин, $S = 0,5$ мм/об, $t = 4,1$ мм) [5]

В тех случаях, когда нет необходимости в изучении законов распределения температур на контактных площадках или в теле инструмента и детали, наиболее удобным показателем тепловой напряженности процесса резания является средняя температура резания на всей поверхности контакта инструмента со стружкой и деталью.

Температура в зоне резания может оказывать влияние на процесс резания из-за изменения свойств материала инструмента, обрабатываемого материала и условий взаимодействия инструмента и обрабатываемого материала на контактных площадках.

При оценке влияния температуры на свойства обрабатываемого материала необходимо учитывать два фактора — продолжительность воздействия высокой температуры и скорость деформации.

Закономерности, установленные в условиях статических испытаний, получают после длительного прогрева образцов. Так как контактные площадки передней и задней поверхностей инструмента нагреваются длительное время, закономерности изменения

свойств инструментального материала в зависимости от температуры целиком приложимы к режущему инструменту. Стружка же срезается со скоростями, в сотни тысяч раз большими, чем при статических испытаниях. Так, при скорости резания $v = 100$ м/мин, $K_t = 2,5$, длине контакта стружки с передней поверхностью $l_n = 2$ мм и задней поверхностью $l_z = 0,1$ мм время контакта стружки с передней поверхностью реза

$$\tau_n = \frac{60l_n}{1000v_c} = \frac{60 \cdot 2}{1000(100/2,5)} = 0,003 \text{ с,}$$

с задней поверхностью

$$\tau_z = \frac{60l_z}{1000v} = \frac{60 \cdot 0,1}{1000 \cdot 100} = 0,00006 \text{ с.}$$

Действие высокой температуры в течение тысячных и даже сотых долей секунды совершенно недостаточно для протекания в толще срезаемого металла структурных превращений и изменения механических свойств обрабатываемой детали. Поэтому воздействие высокой температуры в зоне резания на обрабатываемый металл ограничивается его тончайшими слоями, соприкасающимися с рабочими поверхностями инструмента, и проявляется в изме-



а



б

Рис. 6.3. Оплавление прирезцового слоя (а) и расплавление стружки (б) при точении закаленного порошкового материала 20Х9-П ($v = 200$ м/мин; $S = 0,08$ мм/об; $t = 0,1$ мм)

нении условий трения, контактных нагрузок, напряжений, характера изнашивания и т.д. Экспериментально установлено, что при резании незакаленных сталей толщина контактного слоя не превышает 10 мкм. При резании закаленных сталей с высокими скоростями резания и малыми сечениями среза стружка подвергается гораздо более интенсивному нагреву, вплоть до оплавления прирезцовых слоев или даже всей массы стружки (рис. 6.3).

Методы исследования тепловых потоков

6.2. и температур в зоне резания

Аналитические и численные методы исследования. Для аналитических расчетов тепловых потоков и температур можно эффективно использовать *метод источников теплоты* [6, 7]. В этом случае на первом этапе определяется мощность источников теплоты. Энергия, выделяемая источником теплоты трения на надрезцовой стороне стружки, пропорциональна силе трения и скорости скольжения:

$$Q_{т.п} = F_n v_c = F_n v / K_l,$$

где F_n — сила трения на передней поверхности реза: $F_n = (P_2 - F_s) \sin \gamma + (P_N - N_s) \cos \gamma$; P_2, P_N — соответственно главная и нормальная силы резания; F_s, N_s — сила трения и нормальная сила, действующие на площадке контакта задней поверхности инструмента с деталью; γ — передний угол; v_c — скорость скольжения стружки по передней поверхности; v — скорость резания; K_l — коэффициент укорочения стружки.

Таким образом,

$$Q_{т.п} = \frac{[(P_2 - F_s) \sin \gamma + (P_N - N_s) \cos \gamma] v}{K_l}.$$

На площадке контакта задней поверхности инструмента с поверхностью резания силы возникают как результат упругопластического взаимодействия. Можно считать, что $Q_{т.з} = F_s v$.

Теплоту деформации можно определить как разность между общим количеством теплоты $Q_0 = P_2 v$ и значениями $Q_{т.п}$ и $Q_{т.з}$:

$$Q_{деф} = \frac{[(P_2 - F_s)(K_l - \sin \gamma) + (P_N - N_s) \cos \gamma] v}{K_l}.$$

Для расчета плотности тепловых потоков на контактных площадках принимается, что их распределение отвечает определенным закономерностям (рис. 6.4). Приняв соответствующие законы распределения, можно получить зависимости для расчета тепловых потоков на площадках контакта и в зоне первичных пластических деформаций [7]. В зонах контакта

$$q_{т.п} = \frac{1,6[(P_z - F_s) \sin \gamma + (P_N - N_s) \cos \gamma]v}{bl_{т.п}K_l}; \quad q_{т.з} = \frac{F_s v}{bh_s},$$

где b — ширина среза; $l_{т.п}$ — длина контакта стружки с передней поверхностью; h_s — длина контакта инструмента с поверхностью резания.

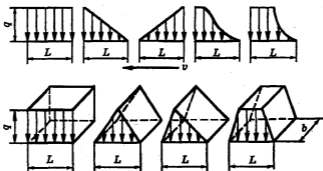


Рис. 6.4. Схемы распределения плотности тепловых потоков [6]

При обработке сталей как в сыром, так и в закаленном состоянии пластические деформации происходят в сравнительно узкой области, т.е. деформации всех участков стружки, расположенных вблизи плоскости сдвига, можно считать одинаковыми. На этом основании считаем, что энергия деформации, а следовательно, и интенсивность источника теплоты деформации распределены в плоскости сдвига равномерно. Отнеся $Q_{деф}$ к площади сдвига, получим:

$$q_{деф} = \frac{[(P_z - F_s)(K_l - \sin \gamma) + (P_N - N_s) \cos \gamma]v \sin \Phi}{StK_l}$$

Исходя из теплового баланса между телами и принимая средние температуры на поверхностях контакта со стороны обоих контактирующих тел равными, можно рассчитать итоговые тепловые по-

токи и соответствующие температуры. При этом вводится целый ряд эмпирических допущений об условиях теплообмена.

Метод источников теплоты характеризуется сложностью и трудоемкостью расчетных операций, их в значительной степени эмпирическим характером, а также требованием обязательной стационарности процесса. Введение в расчет фактора времени и попытка учета нелинейности теплофизических свойств обрабатываемого и инструментального материалов в зависимости от температуры делает использование данного метода практически невозможным. В этом случае можно применять численные методы исследования. Среди них — *метод конечных разностей* [8, 12], основанный на замене истинных значений производных, входящих в дифференциальное уравнение теплопроводности и аналогичные ему, приближенными значениями в определенных точках — узлах. Эти узлы являются центрами элементов конечной длины, участвующих в теплообмене, на которые разбивается твердое тело. Пример формирования конечно-разностной сетки и результаты расчетов приведены на рис. 6.5.

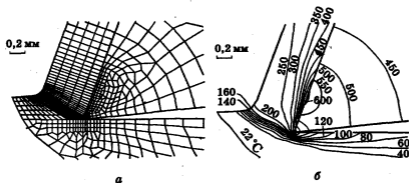


Рис. 6.5. Сетка для расчета поля температур в зоне резания методом конечных разностей (а) и результаты расчета (б) для свободного течения стали твердосплавным резцом ($a = 0,27$ мм, $v = 78$ м/мин) [12]

Метод граничных элементов [1] по своей сути подобен методу источников. В нем использован принцип суперпозиции сингулярных решений, поэтому область применения ограничена классом задач, полностью линейных или линейных относительно приращений. *Метод конечных элементов* [9, 11] позволяет осуществлять

различную детализацию решения в разных областях изучаемого объекта, причем могут быть использованы объемы, различающиеся по размерам, конфигурации и теплофизическим свойствам.

Два последних метода существенно отличаются друг от друга. При использовании метода граничных элементов строятся регулярные сетки, а особенности геометрии области учитываются только в околограничных точках. Поэтому он применяется для задач с прямолинейными границами областей определения функций. В случае использования метода конечных элементов разбиение на элементы производится с учетом геометрических особенностей области, причем процесс разбиения можно начинать с границы для наилучшей аппроксимации ее геометрии.

Задача определения температурных полей в зоне резания характеризуется, во-первых, геометрической нелинейностью границ определения функции, во-вторых, физической нелинейностью — зависимостью теплофизических свойств материалов от температуры; в третьих, соединением материалов с различными характеристиками. Кроме того, можно предусмотреть нестационарный характер теплообмена и нелинейность граничных условий. Единственный метод, который может это обеспечить, — метод конечных элементов. Пример использования данного метода для расчета тепловых полей в зоне резания приведен на рис. 6.б.

Экспериментальные методы измерения температур. Применяемые в настоящее время экспериментальные методы исследова-

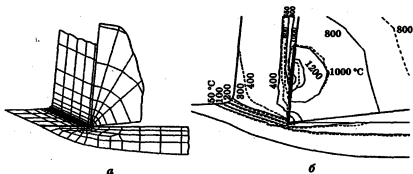


Рис. 6.б. Сетка для расчета поля температур в зоне резания методом конечных элементов (а) и результаты расчета (б) для свободного течения стали (сплошная линия — свойства материалов постоянны; штриховая — свойства материалов зависят от температуры) [11]

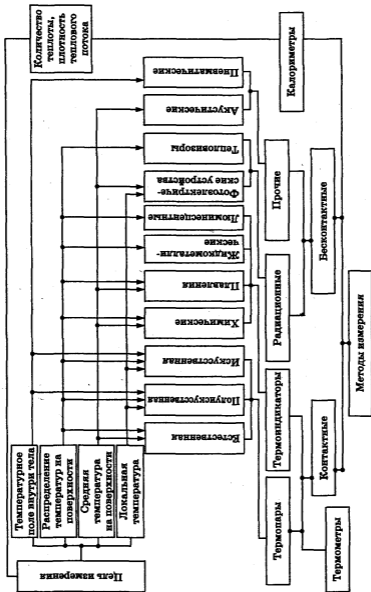


Рис. 6.7. Классификация экспериментальных методов исследования тепловых процессов

ния тепловых процессов в зоне резания чрезвычайно разнообразны и благодаря надежности и простоте являются основными методами исследования. С их помощью можно определить: количество выделяемой теплоты и ее распределение между стружкой, деталью и инструментом; температуру контактных площадок инструмента; температурные поля в зоне деформации и режущем клине инструмента (рис. 6.7). Рассмотрим некоторые из них.

Калориметрический метод позволяет определять количество теплоты, переходящей в стружку, деталь и инструмент, а также их средние температуры. Например, улавливая в калориметр горячую стружку, зная массы стружки и воды в калориметре и изменение температуры воды, можно определить среднюю температуру стружки (рис. 6.8, а). Есть также калориметры, в которые погружают деталь и инструмент (рис. 6.8, б).

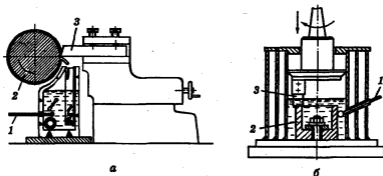


Рис. 6.8. Схемы калориметров:
1 — термометр; 2 — деталь; 3 — резец

Метод пленок заключается в том, что на контактные площадки инструмента наносится в вакууме тонкий слой чистого металла с известной температурой плавления. Теплота, выделяющаяся при резании, оплавляет пленку в области, где достигается температура ее плавления, и тем самым обозначает соответствующую изотерму (рис. 6.9).

Метод термокрасок аналогичен методу пленок, но вместо чистых металлов используются специальные составы, изменяющие свой цвет под действием температур [2]. Некоторые примеры изменения цвета термокрасок приведены в табл. 6.2.

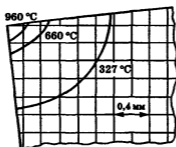


Рис. 6.9. Изотермы на реце из минералокерамики при точении стали 45 в течение 1 мин ($v = 500$ м/мин, толщина металлической пленки 0,05 мм)

Таблица 6.2

Изменения цвета термокрасок при нагреве [3]

Краски с однократным переходом		Краски с многократным переходом	
Изменение цвета	Температура перехода, °C	Изменение цвета	Температура перехода, °C
Розовый/голубой	80	Светло-розовый/светло-голубой/светло-коричневый	65/145
Желтый/фиолетовый	110	Голубой/желтый/черный	190/320
Белый/коричневый	175	Голубой/светло-коричневый/черный	240/340
Зеленый/белый	440	Зеленый/светло-фиолетовый/темно-зеленый	1165/1235
Красный/желтый	560	Коричневый/серо-голубой/светло-коричневый/красно-коричневый	155/230/275
Желтый/оливковый	715	Желтый/оранжевый/серый/коричневый	420/700/820
Желтый/коричневый	805	Розовый/светло-голубой/черный/оливковый	65/145/175/340
Зеленый/коричневый	1000		
Серый/темно-коричневый	1200		

Термоэлектрический метод заключается в том, что если нагреть место спая двух проводников из различных металлов, оставляя при этом свободными концы при более низкой температуре, на последних возникает термоЭДС, которая зависит от разности температур спая и более холодных концов. Замыкая цепь через милливольтметр, можно измерять термоЭДС. Такая цепь называется **термоэлектрической**. Этот метод является наиболее распространенным и подразделяется на несколько разновидностей.

Метод искусственной термопары заключается в том, что в инструменте просверливается отверстие малого диаметра, не достигающее до какой-либо точки передней или задней поверхности примерно на 0,2...0,5 мм, в которое вставляется изолированная термопара (рис. 6.10). Температура в точке соприкосновения термопары и инструмента регистрируется включенным в цепь термопары гальванометром. Этот метод дает возможность определять температуру различных точек на передней и задней поверхностях инструмента и на поверхности стружки (рис. 6.11), т.е. находить температурное поле.

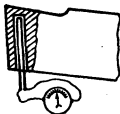


Рис. 6.10. Схема измерения температуры резания методом искусственной термопары

Недостатки классической схемы искусственной термопары — сложность устройства и невозможность определить наивысшую температуру, так как измерение температуры производится не на поверхности контакта резца и стружки, а на некотором удалении от них.

Более точные значения температур можно получить, используя скользящие (рис. 6.12) или бегущие термопары. Принципиальная схема бегущей термопары представлена на рис. 6.13, а. Деталь 4 имеет гребни в форме винта с ленточной резьбой. В них сверлят отверстия диаметром 0,5...0,7 мм, в которые вставляют защитные трубки 3 с двумя изолированными проводниками 1 и 2 термопары.

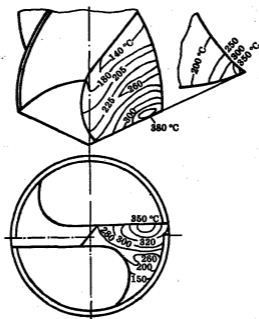


Рис. 6.11. Температурное поле на передней и задней поверхностях сверла диаметром 30 мм при сверлении стали 45 ($v = 25$ м/мин, $S = 0,11$ мм/об), определенное по результатам измерения 160 термопарами [7]

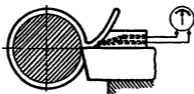


Рис. 6.12. Схема скользящей термопары

Трубка из обрабатываемого или близкого к нему по свойствам материала защищает проводники от преждевременного замыкания. При перерезании резцом трубки проводники замыкаются и на поверхности резания образуется точечная термопара, которая движется вместе с прирезцовым слоем стружки по передней поверхности. Это дает возможность записать распределение температуры по

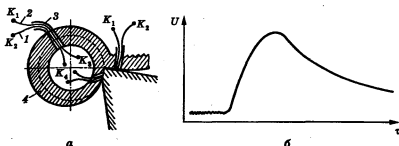


Рис. 6.13. Схема бегущей термопары (а) и осциллограмма ее работы (б)

длине контакта. Участки проводников, оставшиеся в заготовке, позволяют определить сначала распространение температуры по задней поверхности инструмента, а затем температуру обработанной поверхности [7]. Стремление уменьшить размеры слоев термопар и приблизить последние к контактным поверхностям инструмента привело к созданию пленочных термопар [6]. Например, резец с пленочной искусственной термопарой (рис. 6.14) состоит из пластин 2 и 6, прижатых друг к другу с помощью накладки 7 в державке 1. На одну из пластин с помощью трафарета напылены последовательно химически чистое железо 3, слой изоляции 4 и химически чистый никель 5. К концам напыленного термопары припаивают проводники, соединенные с измерительным устройством. Пленочные термопары существенно снижают погрешности измерения и перспективны для теплофизических исследований.

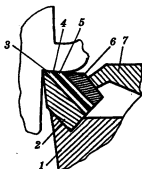


Рис. 6.14. Резец с искусственными пленочными термопарами

В *методе полусинтетической термопары* один из ее элементов (инструмент или деталь) участвует в механической обработке, второй не участвует в этом процессе, а вводится в зону обработки с целью измерения температуры (рис. 6.15).

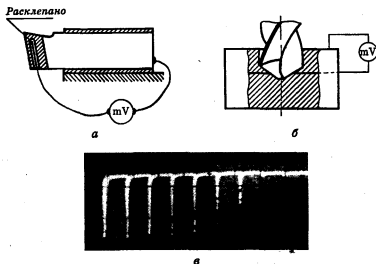


Рис. 6.15. Схемы полусинтетической термопары: а — инструмент-проводник; б — деталь-проводник; в — сигналы перерезаемой термопары на экране осциллографа

Разновидность метода полусинтетической термопары приведена на рис. 6.16 [6]. В тело разрезного резца 1 закладывается изолированная от него токопроводящая пластина 2, расположенная под углом μ к режущей кромке. ТермоЭДС, возникающая между стружкой 3 и пластиной, регистрируется измерительным устройством. Если при свободном течении диска из обрабатываемого материала инструменту сообщить продольное перемещение, можно записать закон распределения температур на площадке контакта резец — стружка.

Метод полусинтетической термопары дает более точные результаты, чем метод искусственной, но, обеспечивая измерение температур в данных точках поверхности, не позволяет изучить закономерности влияния элементов режима резания на наивысшую температуру процесса резания.

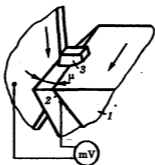


Рис. 6.16. Схема полусинтетической термопары проводник — стружка

В *методе естественной термопары* элементами термопары служат деталь и инструмент, которые, будучи изготовлены из различных металлов, в процессе резания имеют сильно нагретый контакт, являющийся спаем этой термопары. Концы инструмента и детали имеют значительно более низкую температуру. Одна из распространенных схем естественной термопары приведена на рис. 6.17. Заготовка 5 изолируется от станка с помощью диэлектрических прокладок 4 и текстолитовой вставки 4 в деталь, на которую опирается задний центр станка. Резец 6 изолируется от резцедержателя станка текстолитовыми прокладками 7. Для замыкания контакта с деталью в заготовку ввертывается стержень 1, диаметр которого меньше, чем диаметр отверстия в шпинделе. Этот стержень при вы-

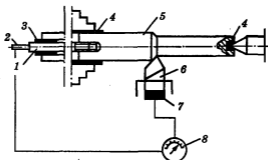


Рис. 6.17. Схема измерения температуры резания методом естественной термопары

ходе из шпинделя проходит через текстолитовую втулку 3, чтобы избежать соприкосновения со станком. На конце стержня установлен токосъемник 2, обеспечивающий надежное замыкание вращающегося и неподвижного участков цепи. Возникающая в процессе резания термоЭДС регистрируется гальванометром 8.

Для устранения дополнительных паразитных термопар, возникающих в местах стыка деталей станка с заготовкой, резец и заготовку изолируют от станка. При исследованиях, не требующих высокой точности, установка может быть значительно упрощена. Деталь не изолируют от станка, считая, что роль возникающей дополнительно термопары ничтожна из-за слабого разогревания заднего центра по сравнению с резцом. В связи с этим провод, ранее присоединяемый к детали, можно присоединить к любой точке станка.

Естественные термопары могут применяться также для измерения средних температур на каждой из контактных площадок в отдельности и для изучения закона распределения температур на поверхности соприкосновения стружки и инструмента. Примером такого устройства является разрезной резец (рис. 6.18). Он состоит из пластин 1 и 2, закрепленных на державке. Одна из пластин — из диэлектрика (минералокерамика), вторая — из токопроводящего материала. Меняя пластины местами при $f \approx 0$, в процессе резания можно измерить средние температуры на каждой из контактных поверхностей. Применяя резцы с разными размерами фаски на пластине из диэлектрика, можно измерить средние температуры на отдельных участках контакта передней поверхности инструмента со стружкой и составить представление о законе распределения температур на этой контактной площадке. Но при этом допускаются ряд погрешностей по сравнению с реальным процессом резания,

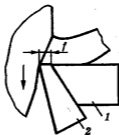


Рис. 6.18. Разрезной резец

в частности, изменяются условия трения на передней поверхности, интенсивность и направление тепловых потоков из-за различий в свойствах используемых инструментальных материалов.

Естественная термопара измеряет некоторую среднюю температуру, тогда как на площадках контакта в процессе резания развиваются различные температуры в разных точках контакта. Отношение этой средней температуры к наивысшей непостоянно.

Метод бесконтактного измерения температур представляет собой регистрацию теплового излучения отдельных участков детали или инструмента в процессе обработки. Он основан на принципе собирания теплового излучения с участка нагретой поверхности 1 с помощью линз 2 и направления его на фотосопротивление 3 (рис. 6.19). Под действием теплового излучения в фотоэлементе возникает ток, который повышается усилителем 4 и регистрируется измерительным устройством 5. Фотоэлектрический метод позволяет измерять температуру различных участков зоны резания и определять температурные поля передней и задней поверхностей реза.

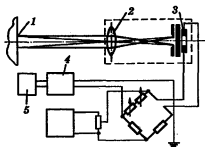


Рис. 6.19. Схема фотоэлектрического пирометра для измерения температуры инструмента, детали и стружки

На основании приведенной общей схемы разработана конструкция и изготовлен прибор для измерения температуры в любой точке зоны резания (рис. 6.20, а). Прибор состоит из корпуса 6, объектива 4, подвижного зеркала 5, фотоэлемента 7, окуляра 9 с сеткой 8. Кроме того, применен специальный резец 1 с прихватом 2 и пластиной 3 из прозрачного для инфракрасной области спектра материала (например, из лейкосапфира) с полированными передней и нижней (опорной) плоскостями, причем опорная плоскость А выполнена зеркальной [10].

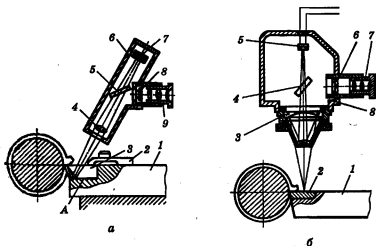


Рис. 6.20. Схемы приборов для измерения температуры при точении:
 а — прозрачным инструментом; б — непрозрачным

Инфракрасные лучи из интересующей нас точки зоны резания, отражаясь от опорной зеркальной плоскости А, фокусируются объективом на приемник инфракрасного излучения. Визуальное наблюдение за зоной резания обеспечивается окуляром с сеткой и подвижным зеркалом. Прибор позволяет измерять в любой точке температуру от 150 до 1200 °С. Высокая точность измерения ($\pm 2...3\%$) обеспечивается специальным зеркальным объективом, а также электронной схемой усилителя. Приемник инфракрасного излучения принимает сигналы с площадки размерами 0,04 × 0,07 мм. Таким образом, имеется возможность измерять температуру в любой точке зоны резания на режущей кромке, передней и задней поверхностях инструмента и т.д. (рис. 6.21).

В качестве режущих материалов применяли алмаз и лейкосапфир. Объектив наводился в зону резания со стороны главной задней поверхности резца. Исследования показали, что таким образом можно измерять температуру даже в том случае, если нет возможности нанести зеркальное покрытие.

Приборы такого типа могут применяться для измерения температуры не только на площадке контакта, но и в любой точке режущей части резца (см. рис. 6.20, б). Последнее обстоятельство используется в тех случаях, когда инструментальный материал не

прозрачен для инфракрасных лучей или когда сходящая стружка закрывает контактную площадку. Зная температуру в точках вне площадки контакта и используя известные закономерности распределения температур, можно теоретически рассчитать температуру в любой точке режущей кромки.

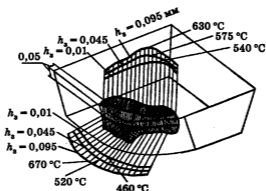


Рис. 6.21. Распределение температуры на поверхностях лейкосапфирового резца при точении стали 45

Тарирование термопар. Большинство методов, используемых в настоящее время для измерения температуры резания, фиксирует не непосредственные значения температур, а параметры электрической цепи, например напряжение (в милливольттах).

Для перехода от показаний в милливольттах к градусам каждое устройство должно быть протарировано с тем прибором, который будет включен в его цепь при замерах температуры.

Тарирование термодпары заключается в том, что определяется соответствие значений температуры показаниям милливольтметра, включенного в цепь термодпары. Для этого спай термодпары помещают в среду, температура которой известна, и фиксируют показания милливольтметра, соответствующие разным температурам. Затем строится тарировочный график, по которому расшифровываются показания милливольтметра термодпары после проведения опытов. Температура холодных концов при тарировке должна быть такой же, как в процессе работы.

Правильная методика тарирования обеспечивает достоверность результатов экспериментов. В настоящее время наиболее распространены два метода тарирования термодпары.

При тарировании естественной термопары первым методом в металлическую ванну (из свинца, олова, сурьмы), подогреваемую каким-либо источником теплоты, вставляют применяемый при опытах резец и стружку от обрабатываемой заготовки (или стержень из материала заготовки). Они не спаиваются, но являются как бы термопарой. В эту же ванну в непосредственной близости от указанной термопары вводят так называемую «контрольную» термопару с проградуированным ранее гальванометром (рис. 6.22).

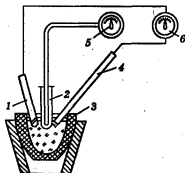


Рис. 6.22. Схема тарирования естественной термопары в расплавленном металле:

1 — резец; 2 — контрольная термопара; 3 — тигель; 4 — пруток;
5, 6 — регистрирующие приборы

При подогреве и охлаждении ванны через определенные промежутки времени регистрируются ее температура, указываемая «контрольной» термопарой, и показания гальванометра тарируемой термопары. По полученным результатам строится график, показывающий значения температуры, соответствующие различным показаниям гальванометра тарируемой термопары (рис. 6.23).

Описанный метод тарирования не воспроизводит действительных условий работы резца, так как не обеспечивает одинаковые площади контакта обрабатываемого металла с резцом. При тарировании температура контактной поверхности постоянна, между тем как на площади контакта стружки с передней поверхностью инструмента в процессе резания развиваются различные температуры. Таким образом, измеряемая при тарировании термопар температура является усредненной.

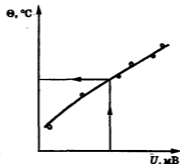


Рис. 6.23. Тарировочный график

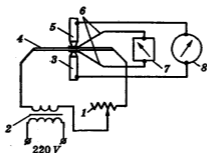


Рис. 6.24. Схема контактного способа тарирования термопар

При втором методе (рис. 6.24) пластинка 5 из материала инструмента приводится в плотный контакт с нагревателем 4 в виде нихромовой пластинки. С другой стороны к нагревателю прижимается стержень 3 из обрабатываемого металла. К нагревателю приварены две тонкие пластинки, представляющие собой расплюснутые концы проводов из меди и константана. Они образуют контрольную термопару 6. Нагрев нихромовой пластинки осуществляется переменным током через трансформатор 2. Для регулирования температуры нагрева служит реостат 1. Температуру пластины нагревателя регистрируют контрольным гальванометром 7. ТермоЭДС, соответствующие определенным температурам нагревателя и торцов тарированной термопары, регистрируются милливольтметром 8. По полученным данным строится тарировочный график.

6.3. Влияние различных факторов на температуру резания

Влияние скорости резания. Оценивая влияние различных факторов на температуру резания, следует учитывать изменение условий подвода и отвода теплоты в этой зоне. Другими словами, можно сказать, что на температуру резания оказывают влияние те же факторы, что и на изменение теплового баланса. Рассмотрим, как будет изменяться температура резания в зависимости от скорости резания, ширины и толщины среза, физико-механических свойств обрабатываемого материала и других факторов.

С увеличением скорости резания возрастает количество теплоты, выделяющейся в зоне резания, а также температура нагрева детали, стружки и инструмента. Однако рост температуры в зоне резания отстает от роста скорости резания. Это отставание особенно усиливается в зоне высоких скоростей, что видно на отдельных участках кривой; представленной на рис. 6.25. Кривую можно разбить на отдельные участки и получить простые зависимости вида

$$\Theta = C_{\Theta} v^{\alpha},$$

где C_{Θ} — коэффициент, учитывающий влияние на температуру резания всех остальных факторов, кроме скорости резания; α — показатель степени, указывающий интенсивность влияния скорости резания на повышение температуры резания Θ . Обычно $\alpha < 1$ (например, при обработке стали со скоростями резания $v = 10 \dots 20$ м/мин $\alpha = 0,5$; при $v = 25 \dots 45$ м/мин $\alpha = 0,4$; при $v = 45 \dots 180$ м/мин $\alpha = 0,2$).

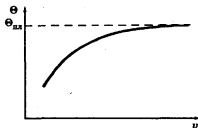


Рис. 6.25. Зависимость температуры от скорости резания

Температура в зоне резания при тяжелых условиях работы может достигать 1000...1100 °С. С увеличением v растет мощность ре-

зания $N = P_2 v$ и, следовательно, количество выделяемой теплоты. Но непосредственно в резец переходит очень небольшое ее количество, а основное — уносится стружкой. Поэтому, хотя с увеличением скорости резания температура резания повышается, этот рост все время замедляется. Кроме того, допущение о том, что $N = P_2 v$ изменяется пропорционально v , не совсем правильно, так как по мере увеличения v сила резания P_2 уменьшается. Унос теплоты стружкой тоже растет с повышением скорости резания, поэтому нет прямой зависимости изменения температуры резания Θ от v .

Влияние физико-механических свойств обрабатываемого материала. На силы резания, а следовательно, на работу резания и количество выделяющейся теплоты, а также на условия теплоотвода оказывают влияние физико-механические свойства обрабатываемого материала. На температуру резания Θ они влияют так же, как и на силу резания P_2 , т.е. имеется тенденция к увеличению Θ с повышением прочности, твердости и пластичности обрабатываемого материала. Большое воздействие на температуру резания оказывают теплопроводность обрабатываемого материала и характер его микроструктуры. Чем выше теплопроводность обрабатываемого материала, тем ниже Θ , так как отвод теплоты от места ее выделения в стружку и деталь более интенсивен. Кроме того, при обработке сталей со структурой зернистого перлита сила и температура резания значительно выше, чем при обработке сталей со структурой пластинчатого перлита. Это объясняется тем, что пластичность структуры зернистого перлита гораздо выше, чем пластинчатого.

В настоящее время довольно широко применяются жаропрочные, нержавеющие и другие труднообрабатываемые стали с высоким содержанием таких легирующих элементов, как Cr, Ni, W, Mn и др. Эти стали имеют аустенитную структуру и отличаются низкой теплопроводностью. При обработке таких сталей температура резания значительно выше, чем при обработке обычных сталей перлитного класса. Еще меньше теплопроводность титановых сплавов, поэтому температура Θ при обработке их очень высокая.

Влияние элементов сечения среза. С увеличением ширины среза b прямо пропорционально растут сила, работа резания и количество выделяющейся теплоты. Во столько же раз увеличивается и длина активной части режущей кромки (рис. 6.26), а соответственно и отвод теплоты. Поэтому с увеличением b температура резания изменяется незначительно. Экспериментально установлена зависимость

$$\Theta = C_{\Theta} b^{\beta},$$

где C_{Θ} — коэффициент, учитывающий влияние на температуру резания всех остальных факторов, кроме ширины среза; β — показатель степени, учитывающий влияние ширины среза на повышение Θ (обычно $\beta \approx 0,1$).

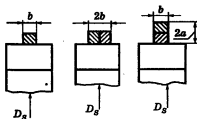


Рис. 6.26. Длина активной части режущей кромки резца при различной ширине среза

В зависимости от толщины срезаемого слоя a сила P_z увеличивается примерно в степени 0,75. Так же увеличиваются работа резания и количество выделяемой теплоты. Одновременно растет, хотя и в меньшей степени, площадь контакта стружки с передней поверхностью резца. Это несколько улучшает условия отвода теплоты, поэтому увеличение температуры отстает от роста толщины среза:

$$\Theta = C_{\Theta} a^{\gamma},$$

где $\gamma = 0,2 \dots 0,3$.

Влияние геометрических параметров инструмента. С изменением переднего угла инструмента изменяются условия подвода и отвода теплоты, а следовательно, и температура резания. С увеличением угла γ уменьшается сила, а значит, работа резания и количество выделившейся теплоты. Однако при этом ухудшаются условия ее отвода, так как уменьшается угол заострения β , т.е. массивность головки резца. Поэтому существует некоторый оптимальный угол γ , при котором уменьшаются силы резания и количество выделившейся теплоты. С увеличением γ выше оптимального уменьшается массивность головки резца, ухудшаются условия теплоотвода, растет температура резания (рис. 6.27). Аналогично влияет на температуру задний угол.

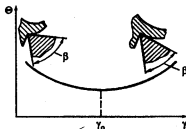


Рис. 6.27. Зависимость температуры резания от переднего угла инструмента

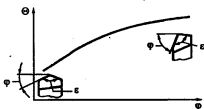


Рис. 6.28. Зависимость температуры резания от главного угла инструмента в плане

С уменьшением главного угла в плане φ увеличивается угол при вершине ϵ , что приводит к возрастанию массы головки реза и улучшению тепловода, а следовательно, к уменьшению Θ , и наоборот (рис. 6.28).

6.4. Оптимальная температура резания

Еще в 30-х гг. XX в. был сформулирован принцип Рейхеля, согласно которому определенному периоду стойкости для заданной пары инструмент — деталь соответствует одна и та же температура резания, не зависящая от комбинации элементов режима резания. Недостаток указанного принципа заключается в том, что физический параметр (температура резания) сопоставляется с временем работы инструмента, которое не связано с условиями трения и рядом других процессов, протекающих на контактных площадках.

А.Д. Макаров [4] пришел к выводу, что постоянство температуры резания следует связывать не с произвольно выбранным перио-

дом стойкости, а с точками, характеризующими минимальную относительную интенсивность изнашивания (рис. 6.29). Учитывая то, что температура контактных поверхностей непосредственно влияет на интенсивность различных механизмов изнашивания, он сформулировал следующее положение: оптимальным скоростям резания (для заданного материала режущей части инструмента) при различных комбинациях скорости, подачи и глубины резания соответствует постоянная температура в зоне резания (*оптимальная температура резания*).

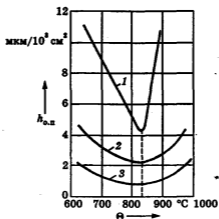


Рис. 6.29. Зависимость относительного поверхностного износа от температуры при точении стали 40ХН2МА резцом из твердого сплава Т14К8 ($t = 1$ мм): 1 — $S = 0,43$ мм/об; 2 — $S = 0,21$ мм/об; 3 — $S = 0,11$ мм/об

Постоянство оптимальной температуры резания экспериментально подтверждено для точения, сверления, фрезерования, нарезания резьб, зубофрезерования и других видов обработки резанием (табл. 6.3).

Таблица 6.3

Оптимальные температуры при резании лезвийными инструментами [6]

Марка материала		Вид обработки	$\theta_0, ^\circ\text{C}$
обрабатываемого	инструментального		
45	T5K10	Точение	850
40X	T15K6	То же	950
XBГ	BK8	•	750

Окончание табл. 6.3

Марка материала		Вид обработки	$\Theta_0, ^\circ\text{C}$
обрабатываемого	инструментального		
ШХ15	T14K8	*	750
X18H10T	T15K6	*	900
XH75BMЮ	BK8	*	700
XH77TЮP	BK8	*	720...750
5XHB	T15K6	Фрезерование	950
50	P6M3	Сверление	270
40X	P18	Зубофрезерование	320...350
40X	T15K6	То же	750
12X18H9T	BK6-OM	Резьбонарезание	760

Отсюда вытекает ряд важных следствий.

1. Для инструментов с любой комбинацией геометрических параметров режущей части ($\alpha, \gamma, \phi, \phi_1, \lambda, r_n$ и др.) точкам минимума кривых, выражающих зависимость интенсивности изнашивания от скорости резания, соответствует одна и та же оптимальная температура резания, хотя уровень оптимальных скоростей резания может существенно колебаться (рис. 6.30).

2. При обработке металлов без охлаждения и с охлаждением различными средами наименьшая интенсивность изнашивания наблюдается при одной и той же оптимальной температуре резания (рис. 6.31).

3. Изменение диаметра обрабатываемой поверхности при точении и диаметра отверстия при растачивании приводит к существенному изменению уровня оптимальных скоростей резания, в то время как оптимальная температура резания остается постоянной (рис. 6.32).

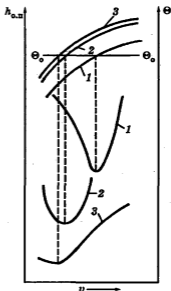


Рис. 6.30. Влияние скорости на температуру резания и интенсивность изнашивания реза:
 1 — $\gamma_1, \alpha_1, \phi_1, r_{n1}$; 2 — $\gamma_2, \alpha_2, \phi_2, r_{n2}$; 3 — $\gamma_3, \alpha_3, \phi_3, r_{n3}$

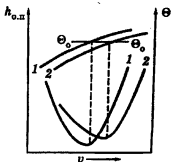


Рис. 6.31. Влияние скорости на температуру резания и интенсивность изнашивания реза:
1 — при работе без охлаждения;
2 — с охлаждением

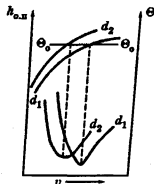


Рис. 6.32. Влияние скорости на температуру резания и интенсивность изнашивания расточного реза ($d_1 < d_2$)

4. Изменение твердости и структуры стали приводит к существенному изменению уровня оптимальных скоростей резания, которым, однако, соответствует одна и та же оптимальная температура (рис. 6.33).

На основании приведенных следствий приходим к выводу, что, поддерживая постоянной оптимальную температуру резания Θ_o , можно осуществлять процесс резания в оптимальном режиме при использовании любых комбинаций v , S , t , γ , α , φ и других факторов без проведения трудоемких и дорогостоящих стойкостных испытаний. Краткие сведения о методах определения оптимальной температуры приведены в гл. 11.

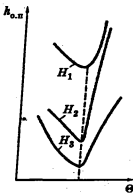


Рис. 6.33. Влияние температуры резания на интенсивность изнашивания реза при обработке материалов разной твердости ($H_1 > H_2 > H_3$)

Литература

1. Бате К. Численные методы анализа и метод конечных элементов / К. Бате, Е. Вилсон. М.: Стройиздат, 1982.
2. Верещака А.С. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями / А.С. Верещака, И.П. Третьяков. М.: Машиностроение, 1986.
3. Измерение температур в технике / Под ред. Ф. Линевега. М.: Металлургия, 1980.

4. *Макаров А.Д.* Оптимизация процессов резания / А.Д. Макаров. М.: Машиностроение, 1976.
5. Производительная обработка нержавеющей и жаропрочных материалов / Н.И. Резников [и др.]. М.: Машгиз, 1960.
6. *Резников А.Н.* Теплофизика процессов механической обработки материалов / А.Н. Резников. М.: Машиностроение, 1981.
7. *Резников А.Н.* Теплофизика резания / А.Н. Резников. М.: Машиностроение, 1969.
8. *Самарский А.А.* Введение в теорию разностных схем / А.А. Самарский. М.: Наука, 1971.
9. *Сегерлинд Л.* Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд. М.: Мир, 1979.
10. *Фельдштейн Е.Э.* Финишная механическая обработка деталей из порошковых материалов / Е.Э. Фельдштейн, В.А. Николаев. Мн.: Выш. шк., 1987.
11. *Tay A.* The importance of allowing for the variation of thermal properties in the numerical computation of temperature distribution in machining / A. Tay // J. Mater. Proc. Technol. 1991. V. 28. P. 49-58.
12. *Tay A.* Using the finite elements method to determinate temperature distributions in orthogonal machining / A. Tay, M. Stevenson, D. de Vahl // Proc. Int. Mech. Eng. 1974. V. 188. № 55. P. 627-638.

ИЗНАШИВАНИЕ, СТОЙКОСТЬ И ПРОЧНОСТЬ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

Основные физические причины

7.1. изнашивания режущих инструментов

Абразивное изнашивание. Снятие стружки с поверхности детали сопровождается изнашиванием режущих лезвий инструментов. Это происходит в результате комплексного действия целого ряда механических и физико-химических явлений на площадках контакта. Механизм абразивного изнашивания заключается в том, что твердые включения обрабатываемого материала, внедряясь в контактные поверхности инструмента, царапают их как микроскопические резцы. Особенно это проявляется, когда твердость инструментального материала в процессе резания уменьшается, а обрабатываемый материал упрочняется. Абразивное действие оказывают частицы нароста, карбиды, интерметаллиды, оксиды и другие включения высокой твердости.

При резании в химически активных средах, например в четыреххлористом углероде, абразивное действие может возрастать вследствие разупрочнения поверхностных слоев инструментального материала, вступившего в химические реакции со средой. Такие слои легче поддаются разрушению абразивными частицами, а изнашивание получило название *абразивно-химического*.

Адгезия, схватывание и перенос вещества. В процессе резания происходят одновременно накапливание частиц на одних микроучастках контактных площадок и срыв с других микроучастков этих же контактных площадок накопившихся на них частиц. В результате по всей контактной поверхности образуются микроочаги относительно кратковременного действия локальных сил адгезии (адгезия — сцепление поверхностных слоев разнородных тел) между поверхностными слоями материалов инструмента и детали, чередующиеся с разрушением и уносом оторванных частиц стружкой или вновь образуемыми участками поверхности резания. Одной из причин локализации сил адгезии является отсутствие непрерывно-

го сплошного контакта между задней поверхностью инструмента и обрабатываемым материалом. Образующаяся поверхность резания имеет специфический микрорельеф, при котором только некоторые его вершины контактируют с задней поверхностью инструмента. Фактическая площадь контакта зависит от условий резания и составляет относительно небольшую часть всей площади поверхности резания (рис. 7.1). Для ее расчетов необходимо знать механические характеристики контактируемых материалов, параметры шероховатости и волнистости контактирующих поверхностей, их микротвердость и прикладываемую нормальную нагрузку [14].

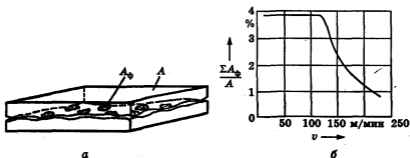


Рис. 7.1. Схема контактирования двух поверхностей (а) и зависимость площади реального контакта от скорости резания (б); A , A_{ϕ} — площади номинального и фактического контактов

Высокие давления в зоне контакта увеличивают его истинную площадь. Сам процесс непрерывного перемещения стружки и обрабатываемого металла вдоль поверхностей инструмента способствует образованию сильных металлических связей; при этом разрушаются слои поверхностных оксидов и других адсорбированных пленок. Поэтому явления адгезии при резании проявляются наиболее четко.

Способствуя возникновению адгезии, процесс резания в то же время непрерывно разрушает возникающие мостики схватывания вследствие перемещения инструмента, стружки и детали относительно друг друга. Мостики образуются и разрушаются непрерывно, и на контактирующих участках действуют циклические нагрузки. В результате усталостных явлений происходит разрушение под поверхностью контакта, в том числе и в инструментальном материале. Установлено, что размеры вырванных частиц зависят не

от твердости или прочности инструментального либо обрабатываемого материала, а от их соотношения в контакте.

Рассмотрим массу частиц, вырванных с передней поверхности резца из твердого сплава ВК8 на пути резания 1,5 м с площади 0,044 мм² [7]. При обработке стали 40Х, когда соотношение твердостей сплава $H_n/H_m \approx 2,5$, масса частиц 0,16 мг. При резании сплава ХН77ТЮР $H_n/H_m \approx 2,33$, масса 0,25 мг; для сплава ХН70МБТЮБ $H_n/H_m \approx 2,25$, масса 0,35 мг; для сплава ХН55ВМТЮК $H_n/H_m \approx 1,93$, масса 0,54 мг.

Снижение интенсивности изнашивания с повышением твердости инструментального материала обусловлено не сокращением участков схватывания и количества срезаемых частиц, а уменьшением их размеров. При этом изменение интенсивности изнашивания пропорционально изменению третьей степени линейных размеров частиц. Это означает, что даже незначительное изменение размеров вырванных частиц вызовет существенное изменение темпов изнашивания. Адгезионному изнашиванию способствует то, что по границам зерен поликристаллических материалов концентрируются внутренние дефекты [6] и происходит отслаивание инструментального материала (рис. 7.2). При каждом очередном нагружении отрываются только те частицы, связи которых были уже ослаблены предшествовавшими циклами нагружения.



Рис. 7.2. Схема отделения частиц инструментального материала по границам зерен

Анализ интенсивности изнашивания быстрорежущих сталей и твердых сплавов выявил различный характер влияния на нее скорости и температуры резания (рис. 7.3).

При низких скоростях резания, когда разогрев контактных слоев незначителен и изменение температуры не сказывается на адгезии, изнашивание инструмента из быстрорежущей стали и твердого сплава обусловлено главным образом адгезионным срезом и отры-

вом материала инструмента. Только в отдельных случаях проявляется абразивное действие твердых частиц обрабатываемого материала и нароста на поверхности инструмента. При температурах менее 500 °С износостойкость быстрорежущей стали выше, чем твердого сплава. Это вполне объяснимо ее более высокой прочностью и хорошей сопротивляемостью контактным циклическим нагрузкам.

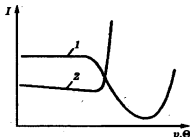


Рис. 7.3. Зависимость интенсивности изнашивания от скорости и температуры резания:
1 — твердый сплав; 2 — быстрорежущая сталь

На повышенных скоростях резания изнашивание инструментов также в значительной степени связано с адгезией. Быстрое перемещение обрабатываемого материала относительно поверхностей инструмента при высоких скоростях резания, повышение температуры и размягчение контактных слоев увеличивают количество микрон адгезии. Поскольку при этом размягчение обрабатываемого материала, как правило, больше, чем инструментального, интенсивность адгезионного изнашивания понижается. Если же в процессе резания в инструментальном материале происходят структурные превращения, приводящие к скачкообразному падению прочности, интенсивность изнашивания резко возрастает. Например, распад мартенсита и отпуск быстрорежущей стали при температуре свыше 600 °С облегчают срез контактных слоев быстрорежущей стали и активизируют изнашивание.

Диффузионное и химическое изнашивание. Наличие на контактных площадках скоплений прилипших частиц обрабатываемого материала или только их следов, наблюдаемых при резании всех конструкционных материалов в диапазоне всех скоростей, свидетельствует о том, что явление адгезии имеет место при любых режимах резания. Оно, однако, не может служить причиной резкого

возрастания интенсивности изнашивания твердого сплава в зоне высоких скоростей и температур резания, поскольку, как уже отмечалось, прочность адгезионных связей в этом случае снижается. Причина этого — диффузионное изнашивание.

Диффузионное изнашивание в процессе резания может происходить вследствие взаимного диффузионного растворения компонентов инструментального и обрабатываемого материалов, а также разрушения поверхностных слоев инструмента в результате структурных превращений и их разупрочнения.

При обычном высокотемпературном контакте скорость диффузии с течением времени резко уменьшается. Однако в процессе резания имеют место высокие температура и давление в зоне контакта, интенсивная адгезия. Большие пластические деформации способствуют взаимному диффузионному растворению компонентов инструментального и обрабатываемого материалов, повышая их химическую активность. Стружка и обрабатываемая поверхность перемещаются относительно инструмента непрерывно и с большой скоростью. При этом в контакт входят все новые и новые участки поверхности обрабатываемого материала и скорость взаимного растворения высока.

Различные компоненты твердого сплава диффундируют в обрабатываемый материал с различной скоростью: наиболее быстро — углерод, менее быстро — вольфрам, кобальт и титан. Одновременно в твердый сплав диффундирует железо. Это приводит к образованию между инструментом, стружкой и поверхностью резания трех диффузионных слоев (рис. 7.4). Наиболее удален от поверхности контакта науглероженный слой 1, за ним следует раствор углерода, вольфрама, титана, кобальта в γ -железе 2, далее возможно образование интерметаллида 3 в виде железировольфрамового или более сложного карбида. Последний слой более хрупкий и разупрочненный. Это приводит к срезу с контактных площадок инструмента слоев инструментального материала движущейся стружкой и поверхностью резания, чему способствует и то обстоятельство, что железо, быстро внедряясь в твердый сплав по границам зерен, ослабляет связи между отдельными блоками твердого сплава, и их срез возможен до окончательной потери этих связей.

В гл. 2 отмечалось, что различные группы твердых сплавов по-разному ведут себя при обработке тех или иных конструктивных материалов. Важную роль в этом играют особенности изнашивания сплавов групп ВК и ТК. Диффузия однокарбидных сплавов происходит относительно равномерно. В сплаве, состоящем из

сложных титановольфрамовых карбидов и избыточных карбидов вольфрама, последние диссоциируют при более низкой температуре и быстрее растворяются в железе. Сложные карбиды выступают над поверхностью контакта, и возникают микровыступы. Во впадины между ними попадают частицы стали, создавая застойную зону (рис. 7.5). В этой зоне постепенно выравнивается концентрация диффундирующих элементов и уменьшается скорость диффузии.

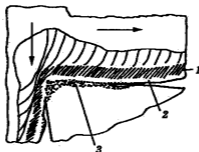


Рис. 7.4. Схема диффузионного изнашивания твердого сплава

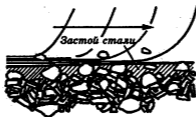


Рис. 7.5. Схема изнашивания двухкарбидного твердого сплава

Застой стали в углублениях длится до тех пор, пока сталь не растворит основание титановольфрамовых карбидов и не произойдет его отделение от основной массы твердого сплава. Далее процесс повторяется. Поэтому сплавы группы ТК при резании сталей значительно превосходят сплавы группы ВК в области высоких скоростей резания, а при низких скоростях, наоборот, лучшие результаты дают более прочные сплавы группы ВК.

Диффузионные процессы характерны не только для твердых сплавов, но и для других материалов, работающих при высоких температурах резания. Например, алмазные резцы при обработке

стали и чугуна теряют свою работоспособность при $\Theta > 900 \dots 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ в результате диффузионного изнашивания. Интенсивность диффузии резко снижается при использовании инструментальных материалов, химически инертных к обрабатываемому материалу.

Диффузия является одним из химических процессов, способствующих изнашиванию. Наряду с ней активное влияние на изнашивание оказывают и другие процессы, например химическое взаимодействие с окружающей средой. Ранее уже отмечалось, что при резании в химически активных средах разупрочняются поверхностные слои инструментального материала, вступившего в химические реакции со средой. Но и при резании на воздухе при высоких температурах наблюдаются химические реакции. В частности, в диапазоне температур $700 \dots 900 \text{ }^\circ\text{C}$ активно вступают в реакцию с кислородом компоненты твердых сплавов, причем кобальт окисляется наиболее активно, а затем простые и сложные карбиды [6]. Твердость образующихся оксидов Co_3O_4 , CoO , WO_3 , TiO_2 в 40–60 раз ниже, чем твердых сплавов. Это нарушает монолитность сплава, ослабляет связи между карбидами и связкой, вследствие чего наблюдается разрушение оксидных пленок, вырывание карбидов из матрицы твердого сплава и изнашивание контактных площадок.

Изнашивание инструментов в результате окисления играет существенную роль и при резании сверхтвердыми материалами. В частности, кубический нитрид бора при высоких температурах превращается в борный ангидрид B_2O_3 [2].

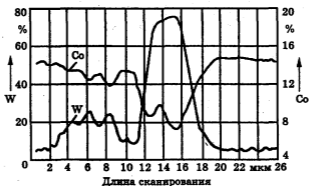


Рис. 7.6. Пример диаграммы микроанализа (инструментальный материал ВК6-М)

Еще сравнительно недавно многие физические явления, рассмотренные выше, излагались без экспериментальных доказательств. Однако в последние годы получили развитие такие методы, как микрорентгеноспектральный анализ, просвечивание электронными пучками, позволившие получить подтверждение многих гипотез. Так, метод микрорентгеноспектрального анализа дает возможность обнаружить на нижней опорной поверхности стружки, поверхности резания и обработанной поверхности прилипшие к ним мельчайшие частицы, являющиеся продуктами изнашивания инструмента, произвести их химический анализ (рис. 7.6), зафиксировать форму, измерить размеры, ориентировочно определить их общую массу.

7.2. Внешняя картина износа лезвий режущих инструментов

Первые признаки изнашивания режущих лезвий обнаруживаются уже в начале резания. При осмотре режущих лезвий с помощью микроскопа заметны микровыкрашивания на режущих кромках и в местах их сопряжения, возрастание радиусов округления лезвий, появление вдоль главной режущей кромки узкой светлой полоски, которая и является признаком начала изнашивания. В процессе работы инструмента увеличиваются размеры площадок износа. В зависимости от условий резания эти площадки могут образовываться на разных участках лезвий инструмента.

Изнашивание задней поверхности инструмента h_z наблюдается при обработке сталей с малой толщиной среза (не более 0,10 мм) и низкими скоростями резания, а также при обработке чугуна. Объясняется это следующим: 1) при малых толщинах среза радиус округления режущего лезвия соизмерим с толщиной среза; 2) при тонкой стружке возрастает относительная упругая деформация поверхностного слоя; 3) путь трения по задней поверхности больше, чем по передней, из-за укорочения стружки. Преимущественное затупление по задней поверхности наблюдается при работе протяжками, метчиками, зуборезными головками, долбьяками, фасонными резцами, цилиндрическими фрезами. Перечисленные инструменты работают на низких скоростях резания и при малых толщинах среза.

При работе резцов с высокими скоростями резания и малой толщиной среза часто наблюдается износ вспомогательной задней по-

верхности инструмента в виде канавок с шагом, равным подаче. Он возникает в результате контактного взаимодействия обработанной и вспомогательной задней поверхностей и может существенно превышать износ по главной задней поверхности.

Интенсивное изнашивание передней поверхности лезвия инструмента происходит при большом давлении на контактной площадке, когда повышается температура резания. Такие условия наблюдаются при обработке стали без охлаждения с высокими скоростями резания и большими толщинами среза ($a > 1,0$ мм). Износ передней поверхности лезвия проявляется в виде лунки, размеры которой определяются размерами площадки контакта. В процессе резания ширина B и глубина h_d лунки постепенно увеличиваются. При этом ширина лунки растет быстрее в сторону, противоположную режущей кромке. Кривизна лунки постепенно уменьшается, а площадка износа увеличивается, и когда ширина перемычки f достигает нуля, наступает полный, или *катастрофический*, износ инструмента.

Наиболее характерные виды износа передней и задней поверхностей резцов приведены на рис. 7.7.

Чаще всего наблюдается одновременное изнашивание задней и передней поверхностей инструмента; при этом происходит округление режущего лезвия инструмента. Такой износ характерен для сверл из быстрорежущей стали, которые изнашиваются по задним (h_z) и передним (h_n) поверхностям, уголкам (h_y), ленточкам (h_x) и поперечной кромке $h_{n,x}$ (рис. 7.8).

В производственных условиях основной мерой износа для большинства инструментов является ширина изношенной площадки на задней поверхности лезвия h_z , а для инструментов с преобладающим износом передней поверхности — глубина h_d и ширина B лунки.

Графическое изображение закономерности нарастания износа за время работы инструмента называется *кривой износа*. В общем случае на кривой износа (рис. 7.9, а) можно выделить три участка: 1 — период приработки, или начального износа, продолжительностью несколько минут (на этом участке наблюдается ускоренное изнашивание, являющееся следствием истирания выступающих участков исходных неровностей на заточенной поверхности инструмента); 2 — период нормального изнашивания, когда шероховатость рабочих поверхностей инструмента становится небольшой; при этом износ постепенно увеличивается приблизительно пропорционально времени работы инструмента (это наиболее продолжительный период работы); 3 — период быстрого (катастрофического)

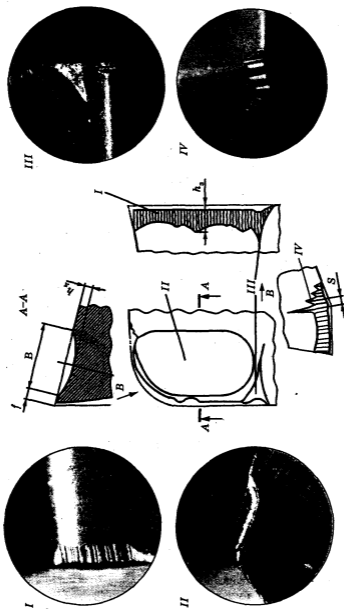


Рис. 7.7. Характерные виды износа резов

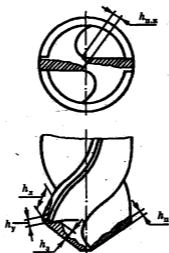


Рис. 7.8. Схема износа сверла

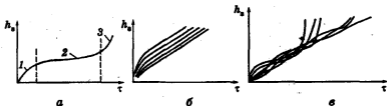


Рис. 7.9. Характер изменения износа резца за время его работы

изнашивания, сопровождающегося выкрашиванием и даже поломками инструмента (этот вид износа недопустим при нормальной работе инструмента).

Необходимо отметить, что сведения о характере зависимостей износ — время и интенсивность изнашивания инструмента, полученные в лаборатории, нельзя считать абсолютно достоверными. В этом случае создаются «тепличные» условия резания и все случайные причины, изменяющие ход процесса резания, сводятся к минимуму. Кривые для инструментов, работающих в одинаковых условиях, различаются, как правило, только периодом приработки (рис. 7.9, б). В производственных же условиях характер кривых износа инструмента изменяется значительно (рис. 7.9, в).

Для количественной оценки износа используется линейная или массовая мера. В первом случае износ лезвий инструментов h_3 и B измеряют с помощью луп или специальных микроскопов с точностью до 0,01...0,05 мм. Для измерения глубины лунки пользуются индикатором. Эти измерения называются *микрометрическими*. В производственных условиях иногда ограничиваются значением h_3 , определяемым с точностью до 0,1 мм. При использовании массовых мер стремятся учесть всю массу продуктов изнашивания лезвия за период его работы. Это осуществляют взвешиванием или расчетом объема изношенной части резца по результатам обмеров [4].

Практическое значение имеют не только абсолютный износ и характер кривой $h_3 = f(v)$, но и интенсивность изнашивания

$$I = h_3 / L_{\text{рез}} \text{ или } I = m / L_{\text{рез}},$$

где h_3 — износ задней поверхности резца; $L_{\text{рез}}$ — путь резания; m — масса изношенных участков режущего лезвия.

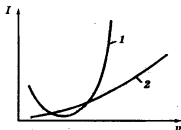


Рис. 7.10. Зависимость интенсивности изнашивания от скорости резания: 1 — Т15К6 — сталь; 2 — ВК6 — чугун

Анализ формы кривых изнашивания показывает, что они зависят от скорости резания и пары обрабатываемый материал — инструментальный материал. Например, при точении сталей и чугунов твердыми сплавами группы ТК зависимости $I = f(v)$ имеют нелинейный характер с ярко выраженным минимумом, а при точении сплавами группы ВК зависимости монотонны (рис. 7.10). На значение I влияют также толщина среза, условия охлаждения, геометрия режущего клина и другие параметры. Характер этого влияния позволяет установить наиболее рациональные условия работы инструментов.

Критерии затупления режущих

7.3. инструментов

Критерий отказа инструмента, характеризующийся максимально допустимым значением износа режущего лезвия, после достижения которого наступает его отказ, называется *критерием затупления*. Принятые критерии зависят от характера обработки и обрабатываемого материала. Например, о возрастании износа инструмента можно судить по быстрому росту сил резания. Такой критерий затупления называется *силовым*.

Если к выполняемой операции не предъявляются высокие требования точности и шероховатости обработанной поверхности, целесообразно доводить инструмент до такой степени износа, при которой полный период его стойкости наибольший. Такой критерий затупления называется *оптимальным*.

Полный период стойкости инструмента

$$\Sigma T = T(k+1),$$

где T — период стойкости инструмента, соответствующий данному износу; k — количество переточек инструмента, допустимых при данном износе.

Чем больше допустимый износ, тем больше длительность работы инструмента до затупления, но тем больший слой металла необходимо срезать с инструмента при его переточке. Следовательно, тем меньше возможное количество переточек. Поэтому полный период стойкости с увеличением допустимого износа сначала увеличивается, а затем, когда количество допустимых переточек становится слишком малым, уменьшается (рис. 7.11).

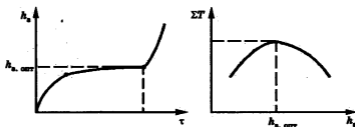


Рис. 7.11. К определению оптимального износа

Износ, соответствующий максимальному полному периоду стойкости инструмента, является оптимальным, т.е. наиболее выгодным. Откладывая его значение на кривой износа, можно найти оптимальный период стойкости при данной скорости резания (рис. 7.11). Эта точка на кривой соответствует моменту перехода периода нормального износа в катастрофический.

Размеры площадки износа инструмента могут ограничиваться требованиями обеспечения необходимого качества или точности обработанной поверхности. Такие критерии называются *технологическими*. В зависимости от обрабатываемого материала наряду с ограничениями шероховатости и точности обработки учитываются и другие факторы. Например, при сверлении пластмасс устанавливают дополнительный технологический критерий затупления сверл по образованию сколов и отслоений материала на входе и выходе сверла из отверстия, появлению прижогов на поверхностях инструмента и обрабатываемой детали, обильному выделению газов. При обработке износостойких покрытий, нанесенных на детали машин, в качестве технологического критерия затупления иногда принимается появление сколов покрытий на обработанной поверхности в результате резкого возрастания сил резания на контактных площадках реза (рис. 7.12).



Рис. 7.12. Скол износостойкого покрытия на обработанной поверхности детали при возрастании износа реза

Более подробно технологические критерии затупления при обработке различных материалов рассматриваются в гл. 11.

7.4. Стойкость режущих инструментов

Стойкостные зависимости. Продолжительность резания новым или переточенным режущим инструментом до его отказа, т.е. до достижения предельно допустимого износа, называется *периодом стойкости* T . Иногда для выражения технологических возможностей период стойкости инструмента дается в метрах пути резания (T_L) и в количестве деталей, обработанных между двумя переточками.

Чем выше интенсивность изнашивания инструмента, тем меньше период его стойкости. Последний служит количественным выражением интенсивности изнашивания инструмента и сильно изменяется в зависимости от условий резания — режимов резания, геометрических параметров режущей части инструмента, применяемой смазочно-охлаждающей технологической среды (СОТС) и т.д. Одним из основных факторов, определяющих период стойкости инструментов, является скорость резания. Это обусловлено в первую очередь тем, что в зависимости от скорости изменяется температура в зоне резания.

Чтобы получить график зависимости $T = f(v)$ для определенного инструмента, его изнашивают до полного затупления. При этом все условия резания, кроме скорости резания v , сохраняются постоянными. Затем строят графики зависимости износа от времени резания $h_s = f(\tau)$ (рис. 7.13), по которым находят соответствующие значения T при предельном износе $h_s = \Delta$, и строят кривые $T = f(v)$ или $v = f(T)$. В последние годы в связи с расширением круга обрабатываемых и инструментальных материалов установлено, что в широком диапазоне режимов резания зависимости $T = f(v)$ практически всегда

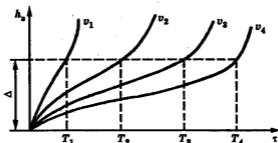


Рис. 7.13. К определению зависимости $T = f(v)$

имеют сложный характер. Известны схемы типовых зависимостей $T = f(v)$ в двойной логарифмической сетке координат (рис. 7.14).

Здесь линия T соответствует степенной зависимости, линии D_1 , D_2 — монотонным зависимостям, в которых с уменьшением скорости стойкость стремится к предельному значению. Линии G_1 и G_2 имеют одно или два экстремальных значения стойкости.

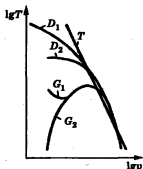


Рис. 7.14. Виды зависимостей $T = f(v)$

Среди факторов, влияющих на характер функции $T = f(v)$, можно выделить: изменение физической природы изнашивания по мере возрастания скорости резания; изменение твердости и прочности инструментального материала по мере возрастания скорости резания; возникновение вибраций в определенных диапазонах условий резания и вследствие этого падение стойкости; образование нароста, которое происходит наиболее бурно при малых скоростях резания и может резко снизить период стойкости инструмента; снижение допустимого износа при многоинструментной обработке; преждевременное снятие по организационно-техническим причинам работоспособных инструментов одновременно с изношенными.

Анализ зависимостей $T = f(v)$ показывает, что для каждого вида обработки, обрабатываемого и инструментального материалов существует максимально достижимое, предельное значение периода стойкости $T_{пр}$. Его ориентировочные значения по данным автомобильной промышленности приведены в табл. 7.1.

При обработке большинства конструкционных материалов зависимость $T = f(v)$ соответствует линии типа D . В условиях одноинструментной обработки оптимальные значения периодов стойкости находятся на участке правой ниспадающей ветви кривой, и зависимость $T = f(v)$ описывается уравнением степенной функции. Такие

уравнения получили широкое распространение и приняты для расчетов во всех общемашиностроительных нормативах по режимам резания. Их легко определить следующим образом.

Таблица 7.1
Значения $T_{пр}$ для различных условий обработки [11]

Инструмент	Материал		$T_{пр}$, мин
	обрабатываемый	инструментальный	
Резцы	Сталь	Быстрорежущая сталь	1500
	Чугун	То же	1000
Резцы	Сталь	Твердые сплавы	600
	Чугун	То же	1500
Сверла	Сталь	Быстрорежущая сталь	700
	Чугун	То же	1500
	Сталь	Твердые сплавы	600
	Чугун	То же	1000
Зенкеры	Сталь	Быстрорежущая сталь	700
	Чугун	То же	1500
	Сталь	Твердые сплавы	500
	Чугун	То же	1000
Фрезы	Сталь	Быстрорежущая сталь	3000
	Чугун	То же	1500
	Сталь	Твердые сплавы	600
	Чугун	То же	2000

Исходя из анализа кривых износа инструментов получаем зависимость площадки износа от продолжительности работы инструмента τ , скорости резания v , толщины a и ширины b срезаемого слоя:

$$h_a = C\tau^\alpha v^\beta a^\gamma b^\epsilon. \quad (7.1)$$

Принимаем $a = \text{const}$ и $b = \text{const}$, критерий затупления $h_a = \Delta = \text{const}$; тогда

$$\tau^\alpha = \frac{\Delta}{C} \frac{1}{v^\beta}.$$

Но $\tau = T$, поэтому

$$T = \left(\frac{\Delta}{C} \right)^{1/\alpha} \frac{1}{v^{\beta/\alpha}}.$$

Введя обозначения $(\Delta/C')^{1/\alpha} = C_T$, $\beta/\alpha = \mu$, получим:

$$T = C_T/v^\mu \quad \text{или} \quad v = C_v/T^m, \quad (7.2)$$

где C_T , C_v — постоянные величины для данных условий резания, зависящие от материала инструмента, обрабатываемого материала, площади сечения среза, геометрии инструмента, условий охлаждения и т.д.; $\mu = 1/m$, или $m = 1/\mu$; m — *показатель относительной стойкости*, характеризующий интенсивность изменения периода стойкости инструмента в зависимости от изменения скорости резания.

Значение m непостоянно. На него влияют как свойства инструментального материала, так и все другие условия процесса резания, и особенно скорость резания: чем тяжелее условия работы инструмента в отношении высоких температур и сильного истирания и чем хуже инструмент сопротивляется изнашиванию, тем меньше показатель относительной стойкости. Приведем ориентировочные значения для некоторых случаев обработки: точение стали быстрорежущими резцами без охлаждения — $m = 0,10 \dots 0,12$; то же, с охлаждением — $m = 0,2$; точение чугуна быстрорежущими резцами — $m = 0,08 \dots 0,10$; точение стали и чугуна твердосплавными резцами — $m = 0,2 \dots 0,3$; нарезание резьбы, протягивание — $m = 0,3 \dots 0,5$.

В логарифмических координатах зависимость (7.2) изображается в виде прямой линии $\lg T = \lg C_T - \mu \lg v$ (μ — тангенс угла наклона линии к оси $\lg v$).

Полученная зависимость $T = f(v)$ имеет важное значение, так как позволяет при изменении v определять период стойкости T . Кроме того, эта зависимость дает возможность решать ряд практических задач, возникающих на производстве. Зная скорость резания v_1 и период стойкости инструмента T_1 , можно определить путем расчета T_2 или v_2 при сохранении прочих условий резания без изменений:

$$T = C_T/v^\mu; \quad v^\mu T = C_T = \text{const},$$

следовательно, $v_1^\mu T_1 = v_2^\mu T_2$; после преобразования имеем:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^\mu \quad \text{или} \quad v_2 = v_1 \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^\mu.$$

При решении практических задач необходимо учитывать, что даже небольшое увеличение скорости резания может вызвать резкое падение стойкости, и наоборот.

Пример 7.1. Пусть $\mu = 8$, $v_1 = 20$ м/мин, $T_1 = 45$ мин, $v_2 = 30$ м/мин. Требуется определить T_2 .

Находим:

$$T_2 = T_1(v_1/v_2)^\mu = 45(20/30)^8 = 1,7 \text{ мин.}$$

Таким образом, увеличение скорости в 1,5 раза снижает период стойкости более чем в 25 раз.

Однако при переходе на малые скорости резания можно получить неправильные результаты. Например, при $T_1 = 60$ мин скорость резания $v_1 = 15$ м/мин. Если же принять $v_2 = 10$ м/мин, то $T_2 = 26$ ч. Так долго инструмент никогда не сможет проработать. Это пример того, как важно критически относиться к эмпирическим формулам. Иными словами, при использовании эмпирических формул необходимо учитывать диапазон изменения переменных величин, при которых получены эти формулы.

Скорость резания, допускаемая инструментом, зависит от его режущих свойств и является скоростью при определенном (заранее обусловленном) периоде стойкости инструмента. Такая скорость при постоянной стойкости обозначается v_T . Тогда пишут: v_{20} , v_{60} , v_{90} . Это означает, что скорость резания соответствует периоду стойкости $T = 20, 60, 90$ мин. Зная v_T , можно определить частоту вращения детали: $n = 1000 v_T / (\pi D)$.

Очевидно, что на период стойкости инструмента влияет не только скорость резания, но и другие факторы. В теории резания металлов обычно выясняют влияние различных факторов не на стойкость, а на скорость резания при постоянной стойкости, т.е. вместо функциональной зависимости $T = f(v, a, b, \gamma, \alpha, \dots)$ раскрывают $v = f(T, a, b, \gamma, \alpha, \dots)$. Часть зависимости относительно T уже раскрыта, поэтому рассмотрим зависимость $v_T = f(a, b, k_m, k_{\text{окл}}, \gamma, \alpha, \dots)$.

Характер и степень влияния на скорость резания v_T толщины a и ширины b среза можно установить, используя уже известные данные. Общая зависимость износа инструмента от различных факторов имеет вид (7.1).

Устанавливаем критерий затупления $h_s = \Delta$ и $\tau = T = \text{const}$; тогда

$$\Delta = C_\Delta T^\alpha v^\beta a^\gamma b^\varepsilon,$$

откуда $v = A / (a^{\gamma/\beta} b^{\varepsilon/\beta})$, где $A = [\Delta / (C_\Delta T^\alpha)]^{1/\beta}$.

Обозначим $\gamma/\beta = y_v$, $\varepsilon/\beta = x_v$, $A = C_v$, тогда

$$v_T = \frac{C_v}{a^{y_v} b^{x_v}}.$$

Зависимость $v_T = f(a, b)$ можно получить путем анализа зависимости $\Theta = f(v, a, b)$, поскольку температура является основным фактором, влияющим на период стойкости. При неизменных обрабатываемом и инструментальном материалах режимы резания, соответствующие одинаковому периоду стойкости, являются режимами с одинаковой температурой резания, т.е. $v_T = v_\Theta = \text{const}$. Зная $\Theta = C_\Theta v^\beta a^\gamma b^\varepsilon$, можно определить

$$v_T = \frac{C_v}{a^{y_v} b^{x_v}},$$

где $C_v = (\Theta/C_\Theta)^{1/\beta}$; $y_v = \gamma/\beta$; $x_v = \varepsilon/\beta$.

Например, проф. А.М. Даниеляном при обработке стали марки 40ХН проходными резцами были получены зависимости $h_s = C_v v^{5,5} S^{3,06} t^{1,11}$ и $\Theta = C_\Theta v^{0,4} S^{0,24} t^{0,1}$. Тогда из первой формулы имеем

$$v_T = \frac{C_v}{S^{3,06/5,5} t^{1,11/5,5}} = \frac{C_v}{S^{0,56} t^{0,2}},$$

а из второй

$$v_T = \frac{C_v}{S^{0,24/0,4} t^{0,1/0,4}} = \frac{C_v}{S^{0,6} t^{0,25}}.$$

Из приведенных формул можно сделать следующие выводы: показатели степени при a и b , полученные из зависимостей $h_s = f(v, S, t)$ и $\Theta = f(v, S, t)$, близки по значениям; оба показателя степени меньше единицы; показатель степени при a больше, чем при b , примерно в 2,5 раза. Это значит, что на скорость v_T гораздо сильнее влияет толщина среза, чем ширина. Таким образом, при снятии слоя металла с заданной площадью поперечного сечения среза период стойкости инструмента и допустимая скорость резания тем выше, чем больше ширина (глубина) и меньше толщина (подача) среза. Показатели x_v и y_v зависят также от свойств обрабатываемого металла (с увеличением его пластичности они увеличиваются) и инструментального материала (для твердосплавного инструмента они меньше, чем для быстрорежущего).

Характер влияния a и b на v_T аналогичен их влиянию на температуру резания и обусловлен теми же причинами, т.е. при увеличении толщины среза возрастает количество выделяемой теплоты, а длина активной части режущей кромки остается неизменной. При увеличении ширины среза наряду с возрастанием количества выделяемой теплоты активная часть режущей кромки становится длиннее и интенсифицируется отвод теплоты. В последнем случае

будет меньше тепловая нагрузка на единицу длины режущей кромки и, следовательно, ниже Θ . Поэтому увеличение ширины среза в меньшей степени сказывается на повышении интенсивности изнашивания инструмента и снижении периода его стойкости, чем увеличение толщины среза.

Суммируя сказанное, можно записать общий вид зависимостей $v = f(T, S, t)$ соответственно для точения, сверления и фрезерования:

$$v = \frac{C_v}{T^m S^{y_v} t^{x_v}} K_v; \quad (7.3)$$

$$v = \frac{C_v D^{x_v}}{T^m S^{y_v}} K_v; \quad (7.4)$$

$$v = \frac{C_v D^{x_v}}{T^m t^{x_v} S^{y_v} B^{n_v} Z^{z_v}} K_v. \quad (7.5)$$

Во всех случаях влияние элементов режима резания на период стойкости инструмента обусловлено их влиянием на температуру резания. Например, увеличение диаметра сверла или фрезы улучшает теплоотвод, а следовательно, увеличивает T и v_T . При фрезеровании этому способствует также уменьшение толщины среза при большем диаметре фрезы. При увеличении числа зубьев уменьшаются их шаг и масса металла, приходящаяся на один зуб, следовательно, ухудшается теплоотвод и снижается T . Ширина фрезерования B (см. гл. 1, 5) играет такую же роль, как ширина среза при точении, поэтому n_v невелико ($\approx 0,1 \dots 0,2$). Значением t при фрезеровании определяется толщина среза, следовательно, x_v при фрезеровании больше, чем при точении.

В формулах (7.3)–(7.5) коэффициент K_v учитывает измененные условия работы режущего инструмента. Значения величин C_v , x_v , y_v и других для каждого конкретного случая обработки различных. Но определять их все с практической точки зрения совершенно нецелесообразно. Обычно в справочно-нормативной литературе приводятся только их наиболее распространенные значения, а для остальных — поправочные коэффициенты, учитывающие измененные свойства инструментального материала (K_n), обрабатываемого материала (K_m), геометрические параметры инструмента (K_r , K_ϕ , ...), условия охлаждения ($K_{охл}$): $K_v = K_m K_n K_r K_\phi \dots$

Стойкостные зависимости определяют экспериментальным путем. Проводимые для этого испытания инструментов можно условно подразделить на полные и ускоренные. Первые проводят в лабора-

торных или производственных условиях до момента отказа инструмента, вторые характеризуются сокращенным временем или объемом испытаний, а также заменой реального процесса изнашивания его физической моделью [5]. Более подробно некоторые виды испытаний инструмента рассматриваются в гл. 11.

Размерная стойкость режущих инструментов. Относительные износы. Для анализа вопросов, связанных с работой инструмента в автоматизированном производстве, важное значение имеет его *размерная стойкость*, под которой понимают способность инструмента обеспечивать получение деталей с определенной точностью. Например, при точении появление износа задней поверхности реза сопровождается увеличением диаметра обработанной детали на удвоенный радиальный износ h_p (рис. 7.15).

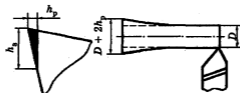


Рис. 7.15. Изменение размеров обработанной детали при радиальном износе реза

Для реза с острозаточенной вершиной значение h_p можно найти по формуле

$$h_p = \frac{h_a}{(\operatorname{ctg} \alpha - \operatorname{tg} \gamma)(\operatorname{ctg} \varphi + \operatorname{ctg} \varphi_1) \sin \varphi}$$

Экспериментально его можно определить с помощью микроскопа или датчиков положения вершины инструмента.

Размерную стойкость инструмента можно характеризовать продолжительностью его работы без подналадки или замены, количеством обработанных деталей, длиной пути резания, площадью обработанной поверхности и объемом снятого металла. Все перечисленные характеристики являются частными и в общем случае не пригодны для выбора оптимальных условий ведения автоматических процессов обработки резанием, поскольку не учитывают уровни скорости резания и допустимого затупления. Например, по периоду стойкости нельзя судить о размерной стойкости сравниваемых инструментов, если последние работали при различных скоростях резания и подачах и были доведены до разной степени затупления.

Более объективными можно считать следующие показатели износа:

- относительный радиальный линейный износ (мкм/м)

$$h_{o,l} = \frac{dh_p}{dL} = \frac{h_p - h_{p,n}}{L - L_n} = \frac{h_p - h_{p,n}}{v(T - T_n)}$$

- скорость размерного износа (мкм/мин)

$$v_p = \frac{dh_p}{dT} = \frac{h_p - h_{p,n}}{(T - T_n)} = v h_{o,l}$$

- относительный радиальный поверхностный износ (мкм/10³ см²)

$$h_{o,s} = \frac{dh_p}{dA} = \frac{h_p - h_{p,n}}{(L - L_n)S} = \frac{h_p - h_{p,n}}{vS(T - T_n)}$$

- относительный радиальный объемный износ (мкм/10³ см³)

$$h_{o,o} = \frac{dh_p}{dV} = \frac{h_p - h_{p,n}}{(L - L_n)St} = \frac{h_p - h_{p,n}}{vSt(T - T_n)}$$

где h_p , $h_{p,n}$ — соответственно предельный радиальный износ и начальный радиальный износ (после периода приработки); L , L_n — пути резания и приработки; T , T_n — периоды размерной стойкости и приработки; A — площадь обработанной поверхности; V — объем снятого металла.

В нормативно-справочной литературе отсутствуют сведения об относительных износах. Поэтому их определяют экспериментальным путем, для чего находят параметры математической модели вида $h_o = f(v, S, t)$. Например, для относительного поверхностного износа при тчении стали марки 30ХГСА получена модель $h_{o,s} = 0,286/S^{1,25}$, а стали марки 15Х18Н12С4ТЮ — $h_{o,s} = 14,2/S^{0,76}$ мкм/10³ см² [7].

Прочность и разрушение режущих

7.5. инструментов

До недавнего времени при конструировании режущего инструмента выполнялись расчеты только прочности корпуса. Однако расширение номенклатуры инструментальных материалов потребовало изучения прочности самого режущего лезвия. Это особенно актуально при работе в современных автоматизированных систе-

мах, в условиях частого изменения режима резания и переменных нагрузок на рабочие поверхности инструмента.

Способность выдерживать без разрушения нагрузку, обусловленную процессом резания, называется **прочностью режущего лезвия инструмента**. В зависимости от механических характеристик материала и схемы напряженного состояния разрушение может носить характер хрупкого или вязкого процесса [13]. Если соотношение нормальных и касательных напряжений соответствует кривой 3 (рис. 7.16, а), разрушение режущего лезвия произойдет путем среза после предварительной пластической деформации. Если напряженное состояние в режущем лезвии отвечает кривой 2, то разрушение сопровождается пластической деформацией и произойдет путем отрыва, а если кривой 1 — путем отрыва без предварительной пластической деформации. Характер разрушения зависит также от скорости нагружения клина и уровня температур в зоне резания (рис. 7.16, б).

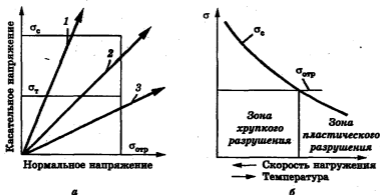


Рис. 7.16. Закономерности разрушения материалов

Современная механика разрушения рассматривает этот процесс как движение магистральной трещины разрушения в результате протекания параллельно-последовательных процессов зарождения, развития и слияния субмикротрещин и микротрещин. На практике в результате хрупкого разрушения наблюдают либо выкрашивание режущих кромок, либо сколы режущей части. В **ы к р а ш и в а н и е** проявляется в отделении малых частиц режущей кромки (рис. 7.17) и вызывается поверхностными дефектами площадок контакта, неоднородностью структуры инструментального

материала, остаточными напряжениями в поверхностных слоях рабочей части инструмента. Выкрашиванию способствуют циклические изменения напряженного состояния в режущем клине инструмента в момент его входа и выхода из контакта с деталью. С к о л ы характеризуются отделением значительного объема рабочей части инструмента. Они происходят преимущественно по передней поверхности и по размерам соизмеримы с размерами площадки контакта. Основные факторы, влияющие на скалывание, — свойства обрабатываемого и инструментального материалов, геометрия режущего клина (γ , β и ϕ) и толщина среза.

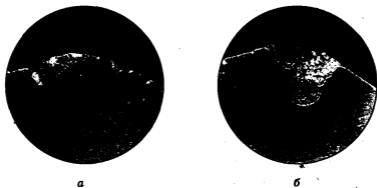


Рис. 7.17. Хрупкое разрушение режущих кромок инструментов:
а — выкрашивание на резце; б — скол вершины резца

Для ряда сочетаний обрабатываемых и инструментальных материалов существует область режимов резания, в пределах которой инструмент не в состоянии срезать стружку, но сам подвергается пластическому деформированию и срезу. Особенностью этого вида разрушения является пластическое течение верхних контактных слоев и их последующий срез вдоль задней, а иногда и передней поверхности лезвия. Развитию процесса пластического течения способствуют интенсивный разогрев и размягчение инструментального материала при высоких температурах резания. Повышению его пластичности способствует и то, что режущее лезвие работает в условиях всестороннего неравномерного сжатия.

Наступление момента пластического разрушения зависит от свойств инструментального материала и условий обработки [6]. Так, при точении конструкционных сталей с толщинами среза

$a = 0,3...0,4$ мм разрушение быстрорежущего резца наступает при $v = 36...60$ м/мин и температуре разогрева режущей кромки $\Theta = 700$ °С, а твердосплавного — соответственно $350...500$ м/мин и $1100...1200$ °С.

В начале пластического разрушения режущее лезвие в результате недостаточной прочности острой режущей кромки округляется. Дальнейшее течение контактных слоев по задней поверхности лезвия приводит к изменению действительного заднего угла, который на некотором участке становится равным нулю. Площадь контакта по задней поверхности увеличивается, и материал инструмента течет к месту выхода задней поверхности из контакта. От текущего материала отрываются частицы и уносятся обработанной поверхностью (рис. 7.18, а). Наряду с пластическим течением инструментального материала при работе на высоких скоростях резания мо-

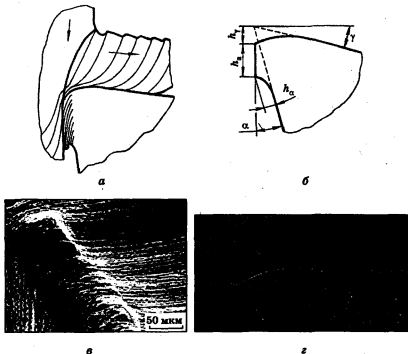


Рис. 7.18. Схемы и внешний вид пластического разрушения режущих кромок инструментов:
 а, в [5] — из быстрорежущей стали; б, г [22] — из твердого сплава

жет происходить пластическое опускание вершины инструмента. Оно характеризуется изменением значений h_r и h_a (рис. 7.18, б) и связано с явлением ползучести инструментального материала.

Пластическое течение инструментального материала происходит под действием адгезионного схватывания и зацепления микронеровностей, впадины между которыми заполнены обрабатываемым материалом. Оно сопровождается вырыванием отдельных карбидных зерен, «пропахиванием» поверхностного слоя твердыми включениями обрабатываемого материала и «намазыванием» материала инструмента на обращенные к нему поверхности стружки и детали. При более высоких температурах между твердыми сплавами и сталью образуется тонкая пленка жидкой фазы, которая быстро удаляется.

7.6. Надежность режущих инструментов

Режущий инструмент в значительной степени определяет работоспособность современного оборудования. Отказы режущего инструмента могут достигать более 50 % общего числа нарушений работоспособности станков с ЧПУ [12], поэтому надежности инструментов уделяется в настоящее время большое внимание. *

Надежность режущего инструмента — это свойство сохранять во времени и в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность инструмента выполнять свои функции в заданных режимах и условиях применения.

Безотказность — свойство инструмента сохранять работоспособность до наступления предельного состояния с необходимыми перерывами для технического обслуживания и ремонтов.

Ремонтопригодность — свойство инструмента, заключающееся в его приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов и поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем проведения технического обслуживания и ремонтов, например заточки или замены режущей пластины.

Некоторые из перечисленных показателей надежности определяются в первую очередь конструкцией инструмента, другие — условиями эксплуатации, т.е. процессом резания. В последнем случае наиболее важен показатель безотказности. При этом следует учесть, что причины отказов инструмента могут быть различными (табл. 7.2). Они могут вызываться: несовершенством конструкции

инструмента; технологическими дефектами, например некачественной обработкой, заточкой и др.; нарушениями условий эксплуатации, например неправильно выбранным режимом резания, дефектами заготовки и пр.; изнашиванием инструмента в процессе эксплуатации и другими причинами.

Таблица 7.2

Причины отказов режущих инструментов из стали марки Р6М5 [3]

Вид инструмента	Причина отказа, %					
	I	II	III	IV	V	VI
Протажка	3...5	1...2	71...76	12...14	3...5	3...5
Развертка	1	1...2	8...9	80...83	2	5...8
Зенкер	2...4	3...5	53...57	23...24	2...3	12
Сверло	10...12	3...6	40...44	27...29	8	6...7
Метчик	4...6	6...8	13...16	9...11	60	3...4
Резец фасонный	1	1...2	24...26	56...61	2...3	10...12
Долбяк	5...8	12...15	5...6	48...55	18	4...6

Примечание: I — поломка; II — скалывание; III, IV — изнашивание рабочих поверхностей лезвия в нормальных условиях работы и при значительной пластической деформации; V — смятие режущей кромки; VI — схватывание.

Отказы по различным причинам приводят к тому, что период стойкости инструмента для данных конкретных условий не является постоянной величиной, а может изменяться в широких пределах. Математические модели отказов можно представить в виде закона распределения. При исследовании закона распределения периода стойкости можно найти несколько теоретических распределений, которые не противоречат результатам эксперимента.

Распределение Вейбулла (рис. 7.19, а) наблюдается при отказах различных видов, например износе и поломках, проявляющихся независимо друг от друга.

Нормальное распределение (рис. 7.19, б) встречается в случае преобладания отказов инструмента одного вида, например износе различной величины. Число внезапных отказов в этом случае мало.

Экспоненциальное распределение (рис. 7.19, в) наблюдается, если отказы наступают внезапно, независимо от того, сколько времени до этого инструмент находился в эксплуатации и каково его состояние. Это возможно в результате возникновения случайных пиковых нагрузок или случайного вскрытия дефектов в инструменте.

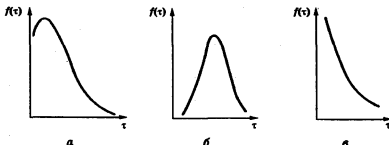


Рис. 7.19. Законы рассеивания стойкости

Предварительно закон распределения стойкости можно оценить по числу неустраняемых отказов m_n в общем их количестве m . Так, закон нормального распределения с достаточной степенью согласованности встречается, если $m_n/m \leq 0,1$, закон Вейбулла — при $0,05 \leq m_n/m \leq 0,7$, экспоненциальный закон — при $m_n/m \geq 0,6$ [15].

По результатам рассеивания периодов стойкости инструмента можно определить ряд показателей его надежности. **Вероятность безотказной работы** $P(\tau)$ — это вероятность того, что в пределах заданного времени τ отказ инструмента не возникает:

$$P(\tau) = \frac{n - m(\tau)}{n},$$

где n — объем выборки, или общее число рассматриваемых периодов стойкости; $m(\tau)$ — количество инструментов, отказавших за время τ во всех рассматриваемых периодах стойкости.

Интенсивность отказов $\lambda(\tau)$ — это плотность вероятности возникновения отказа инструмента, определяемая для времени τ при условии, что до этого момента отказ не возник:

$$\lambda(\tau) = \frac{n_j - n_{j+1}}{n_j \Delta \tau},$$

где n_j , n_{j+1} — количество инструментов, работоспособных соответственно в начале и в конце j -го интервала времени $\Delta \tau$.

Показатель $\lambda(\tau)$ используется для оценки работоспособности инструментов однократного использования. Для восстанавливаемого инструмента существует аналогичный показатель — **параметр потока отказов** $\omega(\tau)$.

Плотность распределения периода стойкости

$$f(\tau) = \frac{\Delta m(\tau)}{n\Delta\tau},$$

где $\Delta m(\tau)$ — количество инструментов, отказавших в интервале времени $\Delta\tau$.

Средний период стойкости

$$\bar{T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tau_i,$$

где τ_i — время безотказной работы i -го инструмента.

Коэффициент вариации стойкости

$$V_{\tau} = \frac{\sigma}{\bar{T}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tau_i - \bar{T})^2}{(n-1)\bar{T}^2}},$$

где σ — среднеквадратичное отклонение стойкости.

Все показатели, кроме V_{τ} , характеризуют конкретные партии инструментов при определенных неизменных условиях испытаний. Наоборот, коэффициент вариации, являясь безразмерным параметром, позволяет сравнивать разные серии испытаний, различающиеся типами, конструкциями инструментов, качеством их изготовления, обрабатываемыми материалами и т.д. Так, в табл. 7.3 приведены данные о вариации стойкости различных инструментов, изготовленных на инструментальных заводах [1].

Зная закон распределения стойкости, можно прогнозировать надежность инструмента (например, определив γ -процентную наработку на отказ). Это наработка режущего инструмента, в течение которой его отказ не возникает с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах. Можно также принять меры по управлению надежностью режущего инструмента, которыми предусматриваются действия, направленные на изменение параметров инструмента, характеристик и условий обработки. Управление надежностью инструмента при неизменной средней наработке между отказами (периодом стойкости) T_1 достигается за счет увеличения вероятности безотказной работы при заданной наработке τ_1 , т.е. $P_2(\tau_1) > P_1(\tau_1)$, и увеличения наработки при заданной вероятности безотказной работы, т.е. $\tau_2 > \tau_1$ при $P_2(\tau_1) = P_1(\tau_1) = P$ (рис. 7.20).

Таблица 7.3

Средние значения коэффициента вариации стойкости режущих инструментов [1]

Инструмент и условия обработки	V_{τ}
Реацы твердосплавные:	
обработка стали черновая	0,20
то же, чистовая	0,25
обработка чугуна черновая	0,30
то же, чистовая	0,22
Реацы быстрорежущие:	
точение стали	0,20
то же, фасонное	0,15
Сверла и зенкеры быстрорежущие:	
ручное затачивание	0,40
машинное затачивание	0,25
Протяжки	0,20
Фрезы концевые быстрорежущие диаметром 6...45 мм	0,25
Фрезы червячные быстрорежущие, $m = 3...6$ мм	0,25
Фрезы прорезные и отрезные	0,20

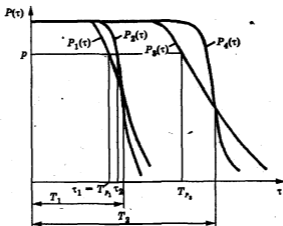


Рис. 7.20. Пути управления надежностью режущих инструментов

При увеличении средней наработки между отказами T_2 достигается одновременное увеличение γ -процентной наработки $T_{P\gamma} > T_P$ с заданной вероятностью безотказной работы для любых τ , т.е.

$P_3(\tau_1) > P_1(\tau_1)$. При сочетании всех указанных методов управления надежностью безотказность инструмента характеризуется функцией $P_4(\tau_1)$. Здесь имеет место изменения конструкции инструмента, совершенствование технологии его изготовления, регулирование параметров режима резания в течение назначенной наработки на отказ T_2 и др.

Стабильная надежность инструментов имеет наиболее важное значение при обработке деталей на многооперационных станках, где отказ хотя бы одного из них требует сложной и длительной наладки всей системы. Поэтому в некоторых справочниках (например, [10]) рекомендуют для повышения надежности инструментов регулировать уровень скоростей резания с помощью поправочных коэффициентов:

Вероятность $P_{...}$	0,50	0,70	0,80	0,85	0,90	0,95	0,99
Коэффициент $K_{v, ...}$	1,07	1,0	0,97	0,95	0,92	0,86	0,75

Учитывается также то обстоятельство, что результирующая вероятность безотказной работы зависит от надежности работы сразу нескольких инструментов (табл. 7.4).

Таблица 7.4

Вероятность безотказной работы лимитирующих инструментов

Количество лимитирующих инструментов	Вероятность безотказной работы комплекта инструментов				
	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90
1	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90
2	0,84	0,86	0,90	0,92	0,95
3	0,89	0,91	0,93	0,95	—

Мониторинг состояния режущих инструментов

7.7.

Общие сведения. Высокая стоимость современного машиностроительного производства способствует широкому использованию безлюдных технологий. Одним из факторов, определяющих дальнейшее развитие таких технологий, является автоматический контроль режущих инструментов с точки зрения их дальнейшей работы. Как результат такого контроля могут быть приняты следующие решения:

□ выключение станка (наиболее простой и радикальный способ);

- изменение соответствующих кадров управляющей программы станков с ЧПУ;
- коррекционные перемещения инструментов;
- замена работающей вершины инструмента;
- изменение подачи или частоты вращения шпинделя станков с адаптивным управлением;
- замена заготовки, не пригодной для обработки.

Наиболее эффективным направлением в контроле режущих инструментов является их мониторинг (непрерывный контроль). Все методы контроля текущей работоспособности режущего инструмента можно условно разделить на четыре группы (табл. 7.5), которые, в свою очередь, можно поделить на методы *прямого контроля*, основанные на регистрации износа инструмента, и *косвенного контроля*, использующие физические явления, сопровождающие процессы резания и изнашивания инструмента.

Таблица 7.5

Классификация методов контроля состояния режущих инструментов

Номер группы	Объект контроля	Контролируемый параметр
1	Режущий инструмент	Ширина площадки износа Вибрации Температура Остаточная радиоактивность Расстояние от вершины или режущей кромки до постоянной базы
2	Обрабатываемая деталь	Размеры Шероховатость обработанной поверхности Температура на поверхности
3	Стружка	Форма Направление схода Температура Радиоактивность
4	Процесс резания	Длительность цикла обработки Мощность резания Силы резания Вибрации Акустическая эмиссия ЭДС в зоне резания Электрическое сопротивление зоны контакта инструмент — деталь

Устройства для прямого контроля обеспечивают более высокую достоверность измерений и поэтому получили широкое распространение. Рассмотрим принципы действия некоторых из этих устройств.

Оптические устройства. Для оценки длины стержневых режущих инструментов (сверл, метчиков) могут использоваться сравнительно простые конструкции со встроенными фотоэлементами. Если инструмент находится между источником излучения и датчиком и перекрывает зону излучения, это сигнализирует о его исправности. Контроль осуществляется либо после каждого рабочего хода, либо в перерывах между обработкой деталей.

Развитие оптических систем позволило создать устройства для измерения износа инструмента в тот момент, когда он не находится в контакте с заготовкой. Действие таких устройств основано на том, что площадка износа лучше, чем остальные поверхности инструмента, отражает световые лучи. Принципиальная схема оптико-электронного устройства приведена на рис. 7.21.

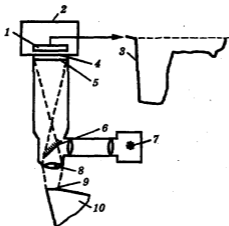


Рис. 7.21. Оптико-электронный преобразователь для контроля износа режущего инструмента:

- 1 — катод; 2 — усилитель сигнала; 3 — выходной сигнал; 4 — цель; 5 — увеличенное изображение площадки износа; 6 — полупрозрачное зеркало; 7 — источник света; 8 — объектив; 9 — площадка износа; 10 — режущий инструмент

Значительно более высокой точностью измерения (до 1 мкм) и большими технологическими возможностями обладают лазерные устройства. Они позволяют не только обнаруживать поломки инст-

румента (либо его полное отсутствие), но и выполнять измерение геометрии режущей кромки. Лазерные устройства могут использоваться также для одновременного контроля нескольких инструментов, например в многошпиндельных сверлильных головках.

Разновидностью оптических устройств являются телевизионные камеры с устройствами распознавания образов. С их помощью можно оценивать как износ, так и сколы режущих кромок.

Контактные устройства. Такие устройства обеспечивают непосредственный контроль инструментов в процессе работы с помощью датчиков касания и измерительных зондов. Погрешность измерения координат при использовании измерительных зондов колеблется в пределах 0,35...1,0 мкм.

Контактные устройства могут использоваться как для контроля положения вершины инструмента в начале его работы, так и для измерения сколов, выкрашиваний и износа режущих лезвий в ходе работы. В последнем случае, однако, эффективность действия датчиков не слишком высока, поскольку контролируется главным образом область острия вершины инструмента, а она не всегда характеризует потенциальный отказ инструмента.

Устройства, основанные на контроле времени прохождения ультразвуковых волн через твердое тело. Для контроля используется время прохождения расстояния от измерительной головки через новый и изношенный инструменты до поверхности детали и обратно. При неизношенном инструменте (рис. 7.22, а) ультразвук проходит расстояние L_1 за время τ_1 . При образовании площадки износа (рис. 7.22, б) путь сокращается на $\Delta L = L_1 - L_2$, а время прохождения сигнала меньше на $\Delta\tau = \tau_1 - \tau_2$, что регистрируется электронной аппаратурой и позволяет определять величину износа.

Косвенные методы мониторинга режущих инструментов основаны на контроле изменения сил резания, мощности, температуры и других физических характеристик процесса резания в результате износа или поломки инструмента. Рассмотрим некоторые из таких устройств.

Устройства, основанные на контроле уровня сил и мощности резания. С возрастанием износа инструмента увеличивается уровень сил и мощности, потребной на резание. Поэтому как непосредственно силы резания, так и производные от них (мощность, крутящий момент на шпинделе, сила тока двигателей главного движения или движения подачи) можно использовать в качестве источника диагностического сигнала.

Действие устройств контроля мощности резания основано на измерениях силы тока и напряжения в двигателе главного движения

или движения подачи. Такие устройства весьма просты, дешевы, не требуют изменений в конструкции станка. Однако надежность их работы зависит от соотношения мощности резания и номинальной мощности двигателя. Если оно невелико, достоверность мониторинга резко снижается. Кроме того, такие устройства регистрируют изменения сил, связанные с возрастанием износа инструмента, со значительным опозданием во времени, что не позволяет вовремя среагировать на катастрофический износ и поломки инструмента. Это привело к практически полному отказу от их использования.

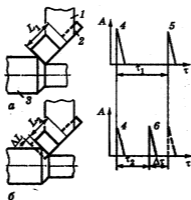


Рис. 7.22. Схема контроля инструмента по времени прохождения ультразвуковых волн:

1 — резец; 2 — генератор УЗ-импульсов; 3 — деталь; 4 — передаваемый импульс; 5 — отраженный импульс (без износа); 6 — отраженный импульс (с износом)

В настоящее время измерение сил осуществляют, используя тензометрические подшипники или оправки, датчики напряжений и деформаций, а также динамометры, встроенные в инструментальную оправку, резцедержатель либо револьверную головку. Во всех случаях место размещения датчиков играет очень важную роль. Чем ближе оно к зоне резания, тем точнее измерения и выше надежность системы контроля.

Широкое распространение получили подшипники с тензометрическими датчиками, наклеенными в канавке на наружном кольце (рис. 7.23). Прохождение шарика (ролика) под датчиком вызывает локальные деформации кольца. Датчик подключен к тензометри-

ческому мосту и генерирует сигналы переменной частоты, зависящей от частоты вращения вала и количества шариков в обойме подшипника. Амплитуда сигналов пропорциональна действию внешних и внутренних (возникших в результате предварительного нагружения) сил.

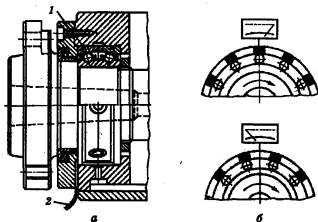


Рис. 7.23. Использование тензометрического подшипника [8]:
 а — конструкция; б — схема действия; 1 — тензометрические датчики;
 2 — кабель

Пружинящие кольца с наклеенными на них тензометрическими датчиками можно использовать для измерения главной силы резания, монтируя их под основанием револьверной головки.

Весьма перспективно использование для контроля сил резания пьезоэлектрических датчиков. Принцип их действия основан на известном физическом явлении, когда на поверхности некоторых диэлектриков (например, кристаллов кварца) в результате механической деформации генерируется электрический заряд. На рис. 7.24 показана принципиальная схема пьезоэлектрического датчика для измерения сил резания. Датчик крепится к корпусной детали, резцедержателю или другому элементу станка, в которых под действием сил резания возникают механические деформации. Датчик крепится к деформируемой поверхности винтом с силой F_0 и измеряет силу F_{02} в месте контакта поверхности с пьезоэлектрическим элементом. Сила F_{01} приложена в базовой точке датчика. Расстояние между точками равно L .

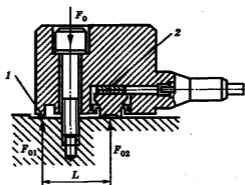


Рис. 7.24. Схема наружного закрепления пьезоэлектрического датчика [21]:
1 — базовая точка; 2 — пьезоэлектрический элемент

Наряду с одиночными пьезоэлектрическими датчиками используются также плиты, в которые может быть встроено от одного до четырех датчиков. Наиболее часто такие устройства устанавливаются между основанием револьверной головки и поперечным суппортом станка. Пьезоэлектрические датчики могут располагаться не только снаружи, но и между деталями, имея вид колец.

В большинстве случаев устройства для контроля сил резания и крутящих моментов сориентированы на выявление момента катастрофического износа. В зависимости от уровня электронной поддержки можно контролировать как статическую составляющую силы (рис. 7.25), так и совместно статическую и динамическую, возникающую в результате колебательных процессов в зоне резания (рис. 7.26).

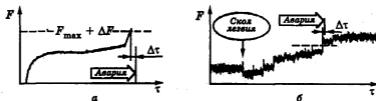


Рис. 7.25. Выявление катастрофического износа [18]:
а — на основании сравнения предельно допустимых сил;
б — на основании изменения уровня сил после скола режущего лезвия

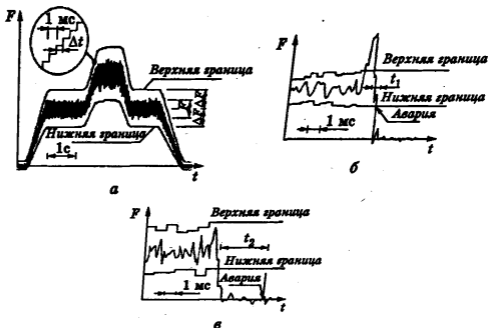


Рис. 7.26. Выявление катастрофического износа с учетом динамической составляющей силы резания [18]:

а — принципиальная схема; б — случай превышения верхней границы (малое дополнительное время на срабатывание t_1); в — случай резкого уменьшения силы (большое дополнительное время на срабатывание t_2)

Устройства, основанные на контроле уровня колебаний. Известно, что в процессе резания генерируются колебания различных частот и амплитуд (рис. 7.27), которые в значительной степени зависят от состояния режущих лезвий. Колебания в диапазоне звуковых и околозвуковых частот регистрируются с помощью датчиков ускорения, как правило, пьезоэлектрических. Исследования показывают, что по мере затупления инструмента возрастает энергия (амплитуда) высокочастотных колебаний (рис. 7.28). Объектом контроля в этом случае служит соотношение энергий высоко- и низкочастотных колебаний, определяемое путем измерения интенсивности колебаний или звукового давления в определенном диапазоне частот.

Практика показывает, что более достоверную информацию обеспечивает не измерение непосредственно амплитуд колебаний, а измерение соотношений амплитуд в том или ином направлении действия сил по мере изнашивания инструмента. Установлено, что такие соотношения в значительной степени зависят от направления действия сил резания (рис. 7.29).

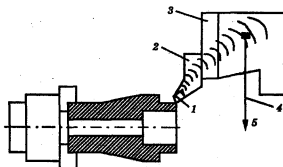


Рис. 7.27. Распространение звуковых волн в ходе обработки детали [17]:
 1 — режущее лезвие инструмента; 2 — корпус инструмента;
 3 — револьверная головка; 4 — система передачи сигнала от датчика;
 5 — сигнал датчика

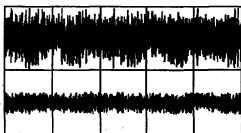


Рис. 7.28. Характер колебаний при точении острым (внизу) и затупленным (вверху) резцами [19]

Устройства, основанные на измерении акустической эмиссии. Под *акустической эмиссией* понимают процесс расхождения волн, возникающих в результате освобождения энергии упругости материала при его деформации, разрушении или структурно-фазовых превращениях. На рис. 7.30 схематично показаны источники возникновения акустической эмиссии, действующие в процессе резания. К ним следует добавить зоны износа инструмента, возникновения выкрашиваний и сколов, а также все прочие зоны, в которых возможно выделение механической (коробки скоростей подач, ходовые винты) или электромагнитной (реле, контакторы) энергии.

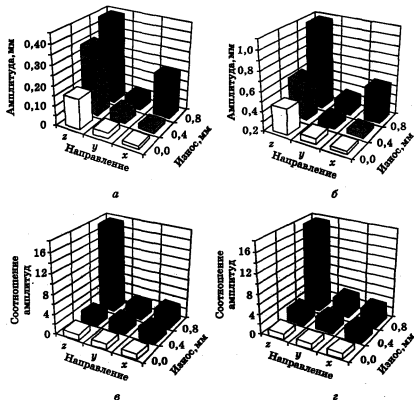


Рис. 7.29. Соотношения абсолютных (а, б) и относительных (в, г) значений амплитуды колебаний в различных направлениях в зависимости от износа резца [16]:

а, в — $v = 90$ м/мин; б, г — $v = 120$ м/мин; $f = 7200$ Гц

Устройства, основанные на измерении температуры и термоЭДС.
В качестве контролируемых параметров в таких устройствах можно использовать:

□ температуру сходящей стружки, которая определяется с помощью оптико-электронного устройства, сфокусированного на зону стружкообразования;

□ изменение электрического сопротивления цепи, в которую входит режущий инструмент;

□ термоЭДС, регистрируемую с помощью естественной термопары;

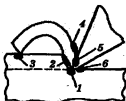


Рис. 7.30. Источники возникновения акустической эмиссии в процессе резания [20]:

1 — микротрещины в обрабатываемом материале;
2, 5, 6 — пластическое деформирование и разрушение; 3, 4 — ломание стружки и ее контактирование с другими поверхностями; 5, 6 — трение

□ смещение верхней границы скоростей наростообразования (в данном случае используется явление резкого изменения полной ЭДС резания при исчезновении нароста).

Принципиальная схема устройства для контроля электрического сопротивления цепи в зоне резания приведена на рис. 7.31. На резец 2 между слоями диэлектрика 3 наносится тонкая пленка проводника 4, имеющая заданные параметры электрического сопротивления. При обработке детали 1 на резце появляется площадка износа h_3 и уменьшается сопротивление пленки проводника. Для измерения износа используется электрическая схема, содержащая генератор

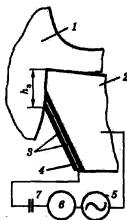


Рис. 7.31. Схема контроля износа по изменению сопротивления электрической цепи

переменного тока 5, измерительное устройство 6 и конденсатор 7. При этом роль съемника тока с вращающейся детали играет слой 3.

Устройства, основанные на контроле формы стружки. Такие устройства позволяют регистрировать изменения формы стружки по мере изнашивания инструмента, как правило, токарного резца. Такой контроль можно обеспечить, фиксируя инфракрасное излучение из зоны обработки. Его интенсивность будет зависеть от количества находящейся там разогретой стружки. Аналогичным образом действуют и камеры тепловизоров. Изображение с камеры делится компьютером на участки с одинаковой интенсивностью теплового излучения, что позволяет определять характер образующейся в данный момент стружки (рис. 7.32).

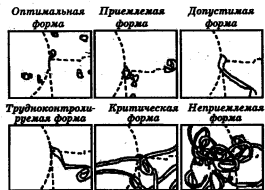


Рис. 7.32. Изображение стружки на экране тепловизора [23]

Для контроля образующейся стружки можно использовать также контактные датчики. Они устанавливаются на передней поверхности инструмента и позволяют регистрировать изменения условий стружкообразования по мере изнашивания резца (изменения радиуса кривизны, направления схода стружки и т.д.).

Информация, полученная с помощью тех или иных устройств контроля инструмента, поступает в компьютерную систему станка, где подвергается анализу и сравнению с существующей базой данных о возможных состояниях инструмента.

Литература

1. *Башков В.М.* Испытания режущего инструмента на стойкость / В.М. Башков, П.Г. Кацев. М.: Машиностроение, 1985.
2. *Беляев И.В.* О механизме влияния внешней среды на процесс резания инструментом из кубического нитрида бора / И.В. Беляев // *Вопр. теории действия смазывающе-охлаждающих средств в процессе обработки металлов резанием.* Горький, 1975. № 1. С. 45–51.
3. *Бельский С.Е.* Структурные факторы эксплуатационной стойкости режущего инструмента / С.Е. Бельский, Р.Л. Тофпенец; Под ред. С.А. Астапчика. Мн.: Наука и техника, 1984.
4. *Грановский Г.И.* Резание металлов / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский. М.: Машиностроение, 1985.
5. Каталог 301.00 «Kennametal Hertel — Milling Programme».
6. *Лоладзе Т.Н.* Прочность и износостойкость режущего инструмента / Т.Н. Лоладзе. М.: Машиностроение, 1982.
7. *Макаров А.Д.* Анализ характеристик обрабатываемости и параметров оптимизации процесса резания / А.Д. Макаров // *Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. Современные пути повышения производительности и точности металлообрабатывающего оборудования и автоматизации технологических процессов в машиностроении.* М., 1980. С. 146–149.
8. Материалы каталогов фирмы «Promess»: Mess-systeme für die Produktionstechnik.
9. Обработка металлов резанием с плазменным нагревом / А.Н. Резников [и др.]. М.: Машиностроение, 1986.
10. Общемашиностроительные нормативы режимов резания для многоцелевых станков фрезерно-сверлильно-расточной группы. М.: ВНИИТЭМР, 1986.
11. Оптимизация режимов обработки на металлорежущих станках / А.А. Гильман [и др.]. М.: Машиностроение, 1972.
12. *Палей С.М.* Контроль состояния режущего инструмента на станках с ЧПУ / С.М. Палей, С.В. Васильев. М.: Машиностроение, 1983.
13. *Подураев В.Н.* Резание труднообрабатываемых материалов / В.Н. Подураев. М.: Машиностроение, 1974.
14. Трение, изнашивание и смазка: Справочник: В 2 кн. / Под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисина. М.: Машиностроение, 1978. Кн. 1.
15. *Хаэт Г.Л.* Прочность режущего инструмента / Г.Л. Хаэт. М.: Машиностроение, 1975.

16. *Adamczyk Z.* Monitorowanie ostrza skrawającego: Metody konwencjonalne i sieci neuronowe / Z. Adamczyk, K. Jemielniak, J. Kosmol, A. Sokolowski; Pod red. J. Kosmola. Warszawa: WNT, 1996.

17. *Honczarenko J.* Elastyczna automatyzacja wytwarzania: Obrabiarki i systemy obróbkowe / J. Honczarenko. Warszawa: WNT, 2001.

18. *Jemielniak K.* Diagnostyka narzędzia i procesu skrawania — stan aktywny i kierunki rozwoju / K. Jemielniak, J. Kosmol // *Mechanik*. 1996. № 10. S. 429–437.

19. *Kosmol J.* Automatyzacja obrabiarek i obróbki skrawaniem / J. Kosmol. Warszawa: WNT, 2000.

20. *Marsumura T.* Autonomous turning operation planning with predicting tool wear and surface roughness / T. Marsumura, T. Obikawa, T. Shirakashi, E. Usui // *Trans. of the ASME*. 1993. V. XXI. P. 359–366.

21. *Schneider H.P.* Ausfälle und Störungen minimieren / H.P. Schneider // *Industrie Anzeiger Extra, NC-Technik*. 1989. S. 11.

22. *Söderberg S.* Wear atlas of HSS cutting tools / S. Söderberg, S. Jakobson, M. Olsson // *Proc. of the 5-th Int. Congr. of Tribology*. 1989. V 1. P. 412–419.

23. *Widota A.* Diagnostyka obrabiarek i procesu obróbki oraz jej zastosowanie w ASO / A. Widota // *Mechanik*. 1988. №. 4. S. 171–182.

ФОРМИРОВАНИЕ ГЕОМЕТРИИ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛИ

Понятие качества поверхностей деталей

8.1. машин

Показатели качества поверхности детали. В современном машиностроении к выпускаемой продукции предъявляются высокие требования. Эксплуатационные показатели отдельных деталей, образующих механизмы и узлы машин, зависят не только от вида материала, но и от того, как и по какому технологическому процессу они изготовлены.

Под *качеством поверхности детали* понимают свойства ее поверхностного слоя, которые формируются в результате воздействия на поверхность одного или нескольких последовательно применяемых технологических методов обработки. Качество поверхности детали определяется *геометрическими* (шероховатость, волнистость, отклонение от нормы) и *физико-механическими* (микротвердость, остаточные напряжения, структура) *характеристиками* поверхностного слоя.

Шероховатость поверхности. Представляет собой совокупность неровностей с относительно малыми шагами, образующих ее рельеф в пределах базовой длины. Микронеровности формируются в результате взаимодействия обрабатываемой поверхности и элементов режущего инструмента или обрабатывающих сред. По ГОСТ 2789-73 количественная оценка шероховатости поверхности (рис. 8.1, а) может производиться по шести параметрам.

1. Среднее арифметическое отклонение профиля Ra :

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|,$$

где n — количество точек профиля на базовой длине; y — расстояние между данной точкой профиля и средней линией.

2. Высота неровностей профиля по десяти точкам Rz :

$$Rz = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 |H_{i\max}| + \sum_{i=1}^5 |H_{i\min}| \right),$$

где $H_{i\max}$ и $H_{i\min}$ — соответственно отклонения пяти наибольших максимумов и минимумов профиля.

3. Наибольшая высота неровностей профиля R_{\max} — расстояние между линией выступов профиля и линией впадин профиля в пределах базовой длины.

4. Средний шаг неровностей профиля S_m — среднее арифметическое значение шага неровностей профиля в пределах базовой длины.

5. Средний шаг неровностей профиля по вершинам S — среднее арифметическое значение шага неровностей профиля по вершинам в пределах базовой длины.

6. Относительная опорная длина профиля tp :

$$tp = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n b_i,$$

где l — длина базовой линии; b — отрезок профиля, отсекаемый на уровне p в материале выступов профиля линией, эквидистантой к средней линии.

С достаточной для практики точностью установлено, что между параметрами шероховатости существуют зависимости $Rz = 4,5Ra^{0,97}$ либо $Rz = 0,75R_{\max}$.

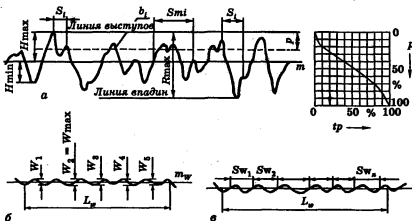


Рис. 8.1. Схема для определения: шероховатости (а); высоты волны (б); шага волны (в)

В ряде случаев большое значение имеет направление неровностей на поверхности обработанной детали, которое устанавливается в технических условиях и обозначается на чертежах.

На эксплуатационные показатели поверхностей деталей оказывают влияние и параметры шероховатости, не предусмотренные ГОСТ 2789-73: радиусы закругления вершин и впадин, углы наклона образующих неровностей и др. Необходимо иметь в виду, что требования к шероховатости поверхности должны быть обоснованными и устанавливаться с учетом функционального назначения деталей. В большинстве случаев для этого достаточно нормировать только один параметр: Ra или Rz .

Шероховатость обработанной поверхности определяется условиями ее обработки (табл. 8.1).

Таблица 8.1

Влияние способа обработки на шероховатость обработанной поверхности

Способ обработки	Материал детали		
	Сталь	Чугун	Цветные сплавы
<i>Наружные поверхности вращения</i>			
Точение:			
черновое	$Rz\ 80...20$	$Rz\ 80...20$	$Rz\ 80...10$
чистовое:			
продольное	$Rz\ 40...5,0$	$Rz\ 40...10$	$Ra\ 2,5...0,63$
продольное, совмещенное с поперечным	$Rz\ 80...10$	$Rz\ 80...10$	$Rz\ 80...5,0$
повышенной точности	$Ra\ 2,5...1,25$	$Ra\ 2,5...1,25$	$Rz\ 80...20$
Шлифование в центрах и врезанием:			
черновое	$Ra\ 2,5...1,25$	$Ra\ 2,5...1,25$	$Ra\ 1,25$
чистовое	$Ra\ 0,63...0,32$	$Ra\ 0,63...0,32$	$Ra\ 0,63...0,32$
тонкое	$Ra\ 0,32...0,10$	—	—
Шлифование бесцентровое напроход:			
однократное	$Ra\ 2,5...1,25$	$Ra\ 1,25...0,63$	$Ra\ 1,25$
трехкратное	$Ra\ 1,25...0,63$	$Ra\ 1,25...0,63$	$Ra\ 1,25...0,63$
шестикратное	$Ra\ 0,63...0,16$	$Ra\ 1,25...0,32$	$Ra\ 0,63...0,32$

Окончание табл. 8.1

Способ обработки	Материал детали		
	Сталь	Чугун	Цветные сплавы
<i>Внутренние поверхности вращения</i>			
Сверление, рассверливание	Rz 160...20	Rz 160...20	Rz 80...10
Зенкерование:			
черновое	Rz 80...10	Rz 80...10	Rz 80...10
чистовое	Ra 5,0...1,25	Ra 5,0...1,25	Ra 2,5...1,25
Развертывание:			
черновое	Ra 5,0...2,5	Ra 5,0...2,5	Ra 2,5...1,25
чистовое	Ra 2,5...0,63	Ra 2,5...0,63	Ra 1,25...0,40
тонкое	Ra 1,25...0,32	Ra 1,25...0,32	Ra 0,63...0,16
Растачивание:			
черновое	Rz 80...20	Rz 80...20	Rz 40...10
чистовое	Ra 5,0...1,25	Ra 5,0...1,25	Ra 2,5...0,63
тонкое	Ra 2,5...0,63	Ra 2,5...1,25	Ra 0,63...0,32
Протягивание:			
«по черному»	Ra 5,0...0,63	Ra 5,0...1,25	Ra 2,5...0,32
по обработанной поверхности	Ra 5,0...0,63	Ra 5,0...1,25	Ra 1,25...0,32
Шлифование:			
черновое	Ra 2,5...0,63	-	-
чистовое	Ra 2,5...0,32	-	-
тонкое	Ra 0,63...0,16	-	-
<i>Обработка плоских поверхностей</i>			
Фрезерование торцовой фрезой:			
черновое	Rz 40...10	Rz 40...10	Rz 20...5,0
чистовое	Ra 2,5...1,25	Ra 2,5...1,25	Ra 2,5...0,63
тонкое	Ra 2,5...0,63	Ra 2,5...0,63	Ra 2,5...0,32
Протягивание	Ra 2,5...0,63	Ra 2,5...1,25	Ra 1,25...0,32
Шлифование:			
черновое	Ra 5,0...1,25	Ra 5,0...1,25	-
чистовое	Ra 2,5...0,63	Ra 2,5...0,63	-

Волнистость поверхности. Представляет собой совокупность периодически повторяющихся неровностей на поверхности детали. Причиной появления волнистости являются недостаточная жесткость и колебания в ячейках технологической станочной системы. Для микрорелье-

ефа поверхности (шероховатости) отношение шага к высоте неровностей не превышает 50, а для макрорельефа (волнистости) отношение шага волны к ее высоте значительно больше: $50 \leq Sw/Wz \leq 1000$.

На рис. 8.1, б, в представлены схемы волнистости. Высота волнистости Wz определяется как среднее арифметическое из пяти ее значений W_i , измеренных на длине участка L_w , равного не менее пяти действительным наибольшим шагам волнистости Sw :

$$Wz = (W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5)/5.$$

Средний шаг волнистости Sw есть среднее арифметическое расстояние Sw_i между одноименными сторонами соседних волн, измеренное по средней линии профиля m_w :

$$Sw = \frac{\sum_{i=1}^n Sw_i}{n}.$$

Для волнистости определяется также ее наибольшая высота W_{max} как расстояние между наивысшей и наименьшей точками профиля в пределах L_w , измеренное на одной полной волне.

Физико-механические свойства поверхностного слоя. Тонкий поверхностный слой деталей машин имеет иные механические, физические, химические свойства и напряженное состояние, чем в глубинной части металла. Глубина поверхностного слоя в зависимости от вида обработки находится в пределах от нескольких десятитысячных до сотых и десятых долей миллиметра, оказывая большое влияние на работоспособность деталей машин. Отличие свойств тонких поверхностных слоев от свойств сердцевины обусловлено суммой механических, тепловых и физико-химических воздействий на поверхность металла в ходе обработки резанием. В результате этого происходит изменение структуры поверхностного слоя, формируется микрорельеф обработанной поверхности и т.п. Это приводит к возрастанию свободной энергии поверхности, увеличению ее адсорбционной активности и другим изменениям, оказывающим существенное влияние на эксплуатационные характеристики детали.

Механизм возникновения шероховатости поверхности

Причины образования шероховатости обработанной поверхности можно разбить на три группы, связанные: 1) с положением режущих кромок инструмента относительно обработанной поверхно-

сти; 2) упругой и пластической деформацией обрабатываемого материала; 3) возникновением вибраций в технологической станочной системе.

Образование неровностей обработанной поверхности в первом приближении можно представить как след рабочего движения режущей кромки (или кромок) инструмента в поверхностном слое металла (рис. 8.2, а). Назовем такой профиль *регулярным*. На образование регулярного профиля шероховатости влияет геометрия режущего инструмента, в частности главный и вспомогательный углы в плане φ и φ_1 , радиус вершины резца r_n и подача S .

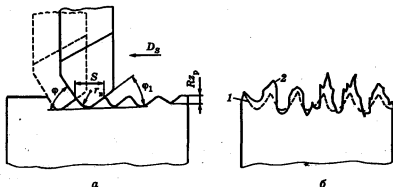


Рис. 8.2. Схема образования шероховатости поверхности: а — образование регулярного профиля шероховатости; б — его искажение за счет пластической деформации в зоне резания; 1, 2 — соответственно регулярный и искаженный (действительный) профили

Исходя из геометрических соотношений расчетная высота неровностей для резца с незакругленной вершиной

$$Rz_p = \frac{S \sin \varphi \sin \varphi_1}{\sin(\varphi + \varphi_1)}$$

Для резца, вершина которого имеет радиус закругления r_n (при $S > r_n$), используются эмпирические зависимости:

$$Rz_p \approx \frac{S^2}{8r_n}; \quad Ra_p \approx \frac{0,0321S^2}{r_n},$$

а при тонком точении

$$Rz_p = \frac{S^2}{8r_s} + \frac{a_{\min}}{2} \left(1 + \frac{r_s a_{\min}}{S^2} \right),$$

где a_{\min} — минимальная толщина среза.

Минимальную толщину срезаемого слоя, гарантирующую нормальные условия резания, можно найти так:

$$a_{\min} = 2\rho[(1 - \cos(45^\circ - \mu'))] = KS \sqrt{\frac{t}{2r_s}},$$

где ρ — радиус округления режущей кромки; μ' — угол трения пары инструментальный материал — обрабатываемый материал; K — коэффициент, учитывающий уменьшение размеров сечения среза и механические свойства обрабатываемого материала; для стали 45 $K = 0,3$.

Обычно a_{\min} находится в пределах 0,02 мм.

Из приведенных формул следует, что чем больше S , ϕ и ϕ_1 и меньше r_s , тем высота неровностей больше, и наоборот. Указанную шероховатость называют *поперечной* (ее измеряют в направлении подачи). Одновременно образуется и *продольная шероховатость*, измеряемая вдоль главного движения инструмента (или детали). Обычно поперечная шероховатость больше продольной, поэтому она сильнее влияет на эксплуатационные свойства обработанных поверхностей.

В реальном процессе обработки металлов резанием впереди реза и под обработанной поверхностью образуется определенная зона пластической деформации. Это вносит существенные искажения в регулярный профиль поверхности (рис. 8.2, б), так как пластически деформированный металл в отдельных местах как бы навалкивается, а также вырываются отдельные кусочки металла. Поэтому чем меньше поверхностная пластическая деформация, тем ближе фактический профиль подходит к регулярному.

Исходя из изложенного, значение Rz в общем виде можно представить уравнением [5]:

$$Rz = Rz_p + \Delta Rz,$$

где Rz_p — расчетная величина гребешков; ΔRz — приращение высоты неровностей. Это приращение является суммой трех слагаемых:

$$\Delta Rz = \Delta Rz_{\text{пл}} + \Delta Rz_{\text{упр}} + \Delta Rz_{\text{т.з.}}$$

В данном уравнении составляющая $\Delta Rz_{\text{пл}}$ — приращение высоты микронеровностей в результате пластического течения металла

в направлении вершины остаточного гребешка (так называемого бокового смятия). В процессе резания толщина срезаемого слоя вдоль вспомогательной режущей кромки изменяется от конечной величины до нуля. Деформированный металл на границе зоны сдвига после отделения стружки трансформируется в остаточные микронеровности на обработанной поверхности (см. рис. 8.2, а) и подвергается дополнительной деформации в верхней части канавки износа на вспомогательной задней поверхности, которые образуются при резании с малыми сечениями среза (см. гл. 7). В результате при выходе металла из контакта с режущим лезвием наблюдается его течение в направлении, противоположном движению подачи (рис. 8.3). Интенсивность бокового смятия зависит от направления схода стружки, вспомогательного угла в плане и радиуса округления режущей кромки, сочетания скорости резания и толщины срезаемого слоя.

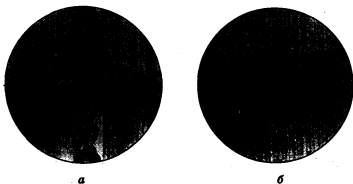


Рис. 8.3. Боковое смятие микровыступов обработанной поверхности при точении пористого спеченного материала:

$$а - v = 25 \text{ м/мин}, S = 0,086 \text{ мм/об};$$

$$б - v = 100 \text{ м/мин}, S = 0,024 \text{ мм/об} (\times 200)$$

Составляющая $\Delta Rz_{упр}$ — приращение высоты микронеровностей, вызванное упругим восстановлением поверхностного слоя; расчетом и измерениями установлено [5], что при обработке различных металлов (алюминия, стали 35ХГС, стали 45 и др.) $\Delta Rz_{упр}$ составляет до 3 % суммы $\Delta Rz_{пл} + \Delta Rz_{т.з}$; $\Delta Rz_{т.з}$ — приращение, вызванное трением задней поверхности инструмента об обработанную поверхность.

При затуплении режущего инструмента шероховатость обработанной поверхности возрастает: при точении — на 50...60 %, фре-

зеровании цилиндрическими фрезами — на 100...115, фрезеровании торцовыми фрезами — на 35...45, сверлении — на 30...40 и развертывании — на 20...30 % [3]. Это объясняется увеличением пластической деформации металла поверхностного слоя.

Уменьшить пластическую деформацию, а следовательно, и искажения регулярного профиля поверхности можно увеличением переднего угла, а также скорости резания, проведением соответствующей термической обработки металла (например, нормализации или улучшения), применением СОЖ и т.д.

Как уже отмечалось, влияние скорости резания на высоту микронеровностей проявляется по-разному, в зависимости от того, склонен или нет обрабатываемый материал к наростообразованию (рис. 8.4). В широком диапазоне скоростей и подач уровень шероховатости может неоднократно изменяться. Это обусловлено одновременным протеканием таких процессов, как наростообразование, изменение направления тепловых потоков, изнашивание контактных площадок инструмента, массоперенос, вибрации, разрушение режущих кромок инструмента и др. (рис. 8.5). Однако существует такое оптимальное их сочетание, при котором высота микронеровностей оказывается минимальной. Сложный характер зависимости шероховатости от подачи можно объяснить тем, что при уменьшении последней уменьшается и толщина среза. Радиус округления режущей кромки оказывается соизмеримым с толщиной среза, и процесс стружкообразования в таких условиях становится неустойчивым, вследствие чего возрастают силы трения на задней поверхности и высота микронеровностей.

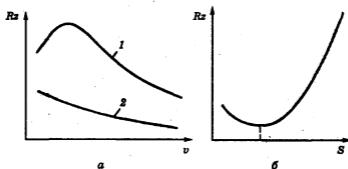


Рис. 8.4. Типовые зависимости $Rz = f(v)$ и $Rz = f(S)$:
 1 — для материалов, образующих нарост; 2 — для материалов, не образующих нарост

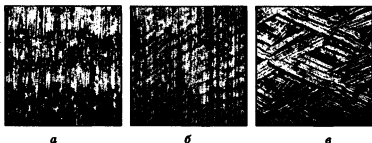


Рис. 8.5. Топография фрезерованных поверхностей:
 а — частицы нароста; б — следы режущих кромок, возникшие в результате колебаний пальцевой фрезы; в — сетка, сформированная торцовыми режущими кромками

Зависимость шероховатости от износа инструмента также неоднозначна. Если при относительно больших толщинах среза изнашивание приводит к росту шероховатости обработанной поверхности, при тонких процессах она в определенном диапазоне значений h_z может несколько уменьшаться. Это, очевидно, вызывается своего рода «естественной оптимизацией» геометрических параметров инструмента по мере изнашивания его режущих кромок. Подобные зависимости Ra от h_z зафиксированы при тонком точении различных сталей, их разветывании и в некоторых других процессах обработки резанием [6].

При операциях шлифования, полирования и доводки поверхностная пластическая деформация часто способствует получению фактических неровностей, меньших по величине по сравнению с неровностями, возникающими как геометрические следы движущихся режущих элементов (абразивных зерен). Здесь при определенных условиях имеет место выглаживание поверхности.

При фрезеровании цилиндрическими фрезами габариты инструмента, в отличие от точения, оказывают сильное влияние на образование продольной шероховатости (измеренной в направлении продольной подачи стола), которая в большинстве случаев бывает больше поперечной и поэтому используется для общей оценки шероховатости поверхности. С некоторым допущением высота неровностей может быть подсчитана по той же формуле, что и для точения:

$$Rz = S_z^2 / (8r),$$

где S_z — подача фрезы на зуб, мм; r — радиус фрезы, мм.

При радиальном биении фрезы, когда ее геометрическая ось не совпадает с осью вращения на величину ϵ и профиль неровностей

фактически формируется только наиболее выступающим зубом фрезы с действительным радиусом вращения $r + e$, в формулу для подсчета высоты неровностей следует вводить не подачу на зуб S_z , а подачу на оборот $S_0 = zS_z$; тогда

$$Rz = \frac{zS_z}{8(r + e)},$$

где z — число зубьев фрезы; e — эксцентриситет (смещение оси симметрии фрезы относительно оси ее вращения).

Отметим, что для различных видов обработки резанием при одних и тех же режимах шероховатость поверхности получается различной в зависимости от свойств материала обрабатываемых деталей. При обработке более твердых материалов высота микронеровностей меньше, чем при обработке мягких. Вязкие и пластичные материалы более склонны к пластическим деформациям и при обработке резанием дают более грубые поверхности. Недостаточная жесткость в ячейках технологической системы и возникающие вибрации вызывают перемещение лезвия режущего инструмента относительно поверхности обрабатываемой детали, что ведет к увеличению шероховатости.

При расчете высоты неровностей при шлифовании нужно учитывать [3], что каждое абразивное зерно, участвующее в резании, прорезает в металле канавку, соответствующую размерам и форме выступающей части абразивного зерна. Круг не имеет сплошной режущей кромки, как у лезвийного инструмента, и при шлифовании на поверхности детали образуются впадины, копирующие профиль и расположение зерен в круге. Но в связи с беспорядочным расположением зерен при каждом последующем проходе круга по шлифуемой поверхности они довольно часто попадают на участки несрезанного металла, прорезая новые канавки и уменьшая высоту шероховатости. Если профиль канавок условно принять за треугольный [2], при каждом новом касании кругом обрабатываемой поверхности высота созданных при первом проходе неровностей уменьшается:

$$Rz_n = 0,75^{n-1} Rz_{нач},$$

где Rz_n — высота неровностей после n -го прохода круга, мкм; n — число проходов (касаний) круга по данному участку поверхности; $Rz_{нач}$ — высота неровностей, созданных при первом проходе круга, мкм.

Зависимость шероховатости обработанной поверхности от режима и условий шлифования имеет вид

$$Ra = \frac{C_{Ra} v_d^p t^q k_1 k_2 k_3}{v_k^w d^m B^n},$$

где C_{Ra} — коэффициент, учитывающий физико-механические свойства обрабатываемого материала; v_d — скорость вращения детали; t — глубина шлифования; k_1, k_2, k_3 — коэффициенты, учитывающие влияние соответственно зернистости шлифовального круга, состава охлаждающей жидкости и условий выхаживания; v_k — скорость шлифовального круга; d — диаметр детали; B — ширина круга; p, q, w, m, n — показатели степени.

При чистовом шлифовании не рекомендуется применять чрезмерно низкие поперечные подачи (менее 0,005 мм), которые создают весьма малые нагрузки на абразивные зерна, а их скольжение относительно шлифуемой поверхности приводит к значительному износу круга.

Повышению окружной скорости круга соответствует уменьшение толщины слоя, снимаемого одним абразивным зерном, в связи с чем и глубина рисок на поверхности, шлифованной с большей окружной скоростью, будет меньше, чем на поверхности, шлифованной с меньшей скоростью круга.

Сильное влияние на шероховатость оказывает зернистость круга, причем при увеличении размеров зерен шероховатость резко возрастает. Однако при шлифовании на более высоких скоростях разница в зернистости круга сказывается на шероховатости шлифованной поверхности в значительно меньшей степени в связи с тем, что в этом случае число встреч круга с определенным участком детали значительно. Применение зачистных ходов при выхаживании позволяет снизить шероховатость шлифованной поверхности, стабилизация которой наступает после 5–8 двойных зачистных ходов. Поэтому при чистовом шлифовании следует применять не менее 5–8 зачистных ходов без поперечной подачи.

Формирование физико-механических свойств поверхностного слоя металла

8.3. при обработке резанием

Строение поверхностного слоя. Металлы и сплавы имеют поликристаллическое строение и состоят из большого числа беспорядочно ориентированных и разных по размерам кристаллических зерен, которые, вставая друг в друга, образуют прочное механическое со-

единение. Поэтому поверхность поликристаллического металла представляет собой скопление связанных переходным слоем кристаллов и их обломков с различной ориентацией.

Поверхностный слой — это слой материала между наружной поверхностью детали и условной поверхностью, служащей границей всевозможных изменений, происходящих в исходном материале в процессе обработки. Этот слой формируется как результат контактного взаимодействия обрабатываемого материала, инструментального материала и технологической среды. Условно его можно разделить на несколько зон, характеризующихся специфическими особенностями. Специалисты по-разному дифференцируют эти зоны (рис. 8.6).

Зона I формируется в результате адсорбции* на поверхности детали поляризованных частиц органического происхождения (жирные кислоты, пот и т.д.).

Зона II формируется в результате адсорбции частиц воды (осаждение из водяного пара).

Зона III образуется в результате адсорбции газов (азота, водорода и др.).

Зона IV представляет собой пленку оксидов обрабатываемого материала, возникшую в результате окислительного взаимодействия.

Зоны I—III взаимно перекрываются, имеют аморфную структуру и толщину 0,2...0,3 нм. Толщина зоны IV обусловлена химической активностью обрабатываемого материала и скоростью диффузии кислорода через оксидную пленку. Совместно пленки, входящие в зоны I—IV, препятствуют охрупчивающему воздействию активных веществ технологической среды и предохраняют поверхность детали от коррозии, затрудняя дальнейшую диффузию кислорода и других элементов.

Зона V возникает в результате повреждения зерен металла режущим лезвием и состоит из раздробленных деформированных зерен исходного материала; она имеет аморфную структуру и толщину 0,1...1,0 мкм.

Зона VI охватывает область материала, подвергнутого пластическому деформированию и часто имеющего выраженную текстуру. Физические, химические и особенно прочностные характеристики этой зоны значительно различаются в разных направлениях, т.е. материал становится анизотропным. Толщина зоны обычно не превышает нескольких десятых миллиметра.

* **Адсорбция** — процесс притягивания атомов и молекул газов, паров, ионов, твердых веществ под действием физических сил и химического взаимодействия.

рен и структурно-фазовым превращениям в поверхностном слое. В зависимости от уровня и скорости воздействия высоких температур в этой области формируются слои с различной микроструктурой; общая толщина зоны — несколько десятых миллиметра.

Зона VIII охватывает область упругих деформаций. Ниже ее располагается основной материал.

Зоны I—III оказывают существенное влияние на условия трения на поверхности детали в процессе ее эксплуатации, тогда как зоны V—VIII влияют в первую очередь на условия изнашивания этой поверхности.

При обработке деталей под действием сил резания в поверхностном слое металла происходит его упругопластическое деформирование. Пластическое деформирование распространяется на определенную глубину металла, расположенного под обработанной поверхностью, и сопровождается скольжением, т.е. перемещением отдельных частей кристаллитов по определенным кристаллографическим плоскостям. Процесс скольжения начинается тогда, когда возникают критические сдвигающие напряжения, достаточные для его начала. Пластическому деформированию предшествует упругое, распространяющееся со скоростью, близкой к скорости звука. На пластическое деформирование, при котором происходит перемещение частей кристаллитов, требуется определенное время. Поэтому при больших скоростях деформирования иногда наблюдается межкристаллитная пластическая деформация. В этом случае зерна перемещаются относительно друг друга.

В процессе резания металлов зерна в поверхностном слое вытягиваются в направлении действия силы резания. Кристаллиты ориентируются в основном по кристаллографическим направлениям. Подобная ориентация мелких зерен, вытянутых по направлению деформации, называется *текстурой*.

При наклепе наблюдается снижение электропроводности, теплопроводности и плотности металла, что объясняется увеличением количества дислокаций и вакансий в наклепанном металле. В общем случае с увеличением сил резания и продолжительности их воздействия возрастает пластическая деформация поверхностного слоя металла, а следовательно, увеличивается степень его наклепа N и глубина распространения наклепа h . Так, например, они возрастают с увеличением подачи и уменьшаются с ростом скорости резания (рис. 8.7).

Для приближенного расчета глубины наклепа можно пользоваться методом, базирующимся на решении задач теории пластичности. При несвободном резании острым резцом

$$h = \frac{S(1 - \sin \Phi) \sin 2\varphi}{2 \sin \Phi}, \quad (8.1)$$

где Φ — угол сдвига; φ — главный угол реза в плане.

Угол сдвига

$$\operatorname{tg} \Phi = \frac{\cos \gamma}{K_a - \sin \gamma},$$

где γ — передний угол реза; K_a — коэффициент утолщения стружки.

Формула (8.1) справедлива, когда $S/t < 0,3$.

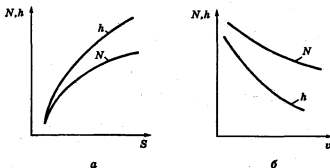


Рис. 8.7. Зависимость степени наклепа N и глубины наклепа h от подачи (а) и скорости резания (б) при точении

Установлено, что возможности упрочнения металла за счет его наклепа ограничены, и при чрезмерной пластической деформации может образоваться «перенаклеп» металла, что приведет к его разупрочнению. Разупрочнение происходит при исчерпании зернами металла возможности упрочняться. При этом наблюдается его разрыхление, появление трещин, отслаивание и т.д.

Наклеп в поверхностном слое приводит металл в структурно-неустойчивое состояние, вызванное неодинаковым распределением внутренних напряжений между отдельными зернами и даже целыми участками металла. В этих условиях имеет место явление отдыха, т.е. стремление металла к возвращению в первоначальное, ненаклепанное состояние, чему способствует упругая деформация наклепанного металла, а также повышенная температура в зоне резания. При комнатной температуре отдых наклепанного металла проходит довольно медленно, однако уже при небольшом нагреве процесс ускоряется. При этом даже незначительные перемещения атомов могут снять искажения кристаллической решетки. Напри-

мер, для снятия искажений атомной кристаллической решетки железа достаточно нагреть его до 200...300 °С, после чего механические свойства железа частично восстанавливаются [3].

При данных температуре и упрочнении чем длительнее металл подвергается отдыху, тем полнее восстанавливаются свойства, которые металл имел до пластического деформирования, т.е. тем полнее его отдых.

При обработке металлов резанием одновременно действуют значительные силы резания, создающие наклеп, и температура, вызывающая разупрочнение металла. Конечное состояние поверхностного слоя определяется соотношением процессов упрочнения и разупрочнения, зависящих от преобладания в зоне резания силового или теплового фактора. В связи с этим всякое изменение режимов резания, вызывающее увеличение усилий резания и степени пластической деформации, ведет к повышению степени наклепа. Увеличение продолжительности их воздействия на поверхностный слой приводит к увеличению глубины распространения наклепа.

Изменение режимов, приводящее к увеличению количества теплоты в зоне резания и увеличивающее продолжительность теплового воздействия, усиливает интенсивность отдыха, снимающего наклеп поверхностного слоя. Влияние указанных явлений на конечное состояние поверхности отмечено, в частности, при точении порошковых материалов после их химико-термической обработки. Микротвердость в этом случае возрастает в зоне низких скоростей вследствие вибраций и в зоне высоких скоростей вследствие вторичной закалки (рис. 8.8).

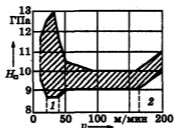


Рис. 8.8. Зависимость микротвердости поверхностного слоя детали из закаленной спеченной стали от скорости резания:
1 — зона вибраций; 2 — зона фазовых превращений

Общие закономерности возникновения наклепа сохраняются и при абразивной обработке.

Экспериментальные исследования показали, что выхаживание при шлифовании оказывает существенное влияние на микротвердость шлифованной поверхности. На рис. 8.9 показаны кривые изменения параметров обработанной поверхности, полученные при шлифовании со скоростью вращения круга $v_k = 30$ м/с, скоростью вращения детали $v_d = 40$ м/мин и при продольной подаче $S_{пр} = 0,8$ м/мин.

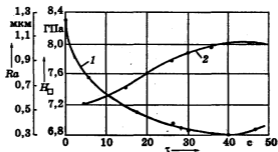


Рис. 8.9. Влияние продолжительности выхаживания на шероховатость (1) и микротвердость (2) шлифованной поверхности

Из рисунка видно, что при выхаживании, особенно в течение первых 15...25 с, микротвердость повышается. Это объясняется увеличением длительности абразивного воздействия на обрабатываемую поверхность, в течение которого натяг в технологической станочной системе становится слабее, уменьшается количество режущих зерен и за счет действия скользящих и давящих зерен наклеп поверхностного слоя детали более интенсивен. Как показали многочисленные исследования, микротвердость поверхностного слоя при выхаживании повышается в среднем на 20...25 %. При шлифовании наклеп поверхностного слоя возрастает вследствие увеличения нагрузки на абразивное зерно, что имеет место при росте глубины шлифования, скорости вращения детали или продольной подачи стола при плоском шлифовании, увеличении размера и радиуса округления абразивных зерен. С увеличением скорости вращения круга уменьшается нагрузка на абразивные зерна и одновременно увеличивается количество теплоты, выделяющейся в зоне шлифования и снижающей наклеп, в результате чего упрочнение поверхностного слоя уменьшается, возможно образование прижогов и микротрещин.

При абразивной доводке различными методами также происходит наклеп металла поверхностного слоя. При этом микротвердость повышается на 15...30 %, а глубина распространения наклепа составляет 5...10 мкм. Все это необходимо учитывать, поскольку микротвердость поверхностного слоя металла и глубина распространения упрочнения оказывают большое влияние на эксплуатационные свойства деталей и являются важными показателями качества их поверхностей.

Степень наклепа в процессе обработки определяется обычно отношением возрастания микротвердости поверхностного слоя металла H_n к микротвердости основного металла или сердцевины H_c :

$$N = \frac{H_n - H_c}{H_c} \cdot 100\%.$$

Глубина наклепанного слоя измеряется в микрометрах и определяется специальными методами. Типовые зависимости параметров наклепа от глубины залегания показаны на рис. 8.10.

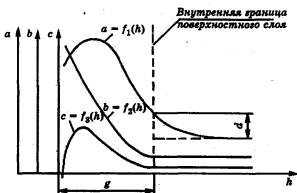


Рис. 8.10. Типовой характер изменения различных параметров наклепа (a , b , c) в зависимости от его глубины

Остаточные напряжения в поверхностном слое металла. Напряжения в поверхностном слое деталей, которые существуют при отсутствии каких-либо внешних воздействий, например температурных или силовых, называют *остаточными напряжениями*. При обработке резанием и вызванных им пластических деформациях металла уменьшается его плотность и соответственно увеличивается удельный объем примерно на 0,3...0,8 % от исходного значения.

Можно предложить следующую схему формирования остаточных напряжений в ходе лезвийной обработки. Вследствие трения задней поверхности инструмента об обработанную поверхность в поверхностных слоях последней возникает пластическая, а ниже — упругая деформация растяжения. По мере движения режущего клина и снятия нагрузки упруго растянутые слои стремятся возвратиться в исходное состояние, но этому препятствуют пластически деформированные слои. В результате внутренние области оказываются частично растянутыми, а в поверхностных слоях возникают остаточные напряжения сжатия.

Остаточные напряжения могут возникнуть в связи с локальным нагревом поверхности обрабатываемой детали. Под действием теплового фактора поверхностные слои стремятся удлиниться, но этому препятствуют более холодные слои, расположенные в глубине металла, и в поверхностном слое возникают напряжения сжатия. При охлаждении наблюдается обратная картина с образованием растягивающих напряжений. Результирующую эпюру напряжений следует рассматривать как результат одновременного действия силового и теплового факторов.

Типичный характер распределения напряжений по глубине поверхностного слоя после лезвийной обработки показан на рис. 8.11. В поверхностном слое можно выделить три участка:

1) верхний (приповерхностный), толщиной 2...8 мкм, в котором формируются напряжения сжатия в результате нормального давления задней поверхности и ее трения об обработанную поверхность;

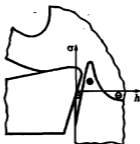


Рис. 8.11. Схема распределения остаточных напряжений при резании пластичных металлов

2) срединный, толщиной несколько сотых миллиметра, с растягивающими напряжениями, возникающими главным образом под воздействием радиуса округления режущей кромки;

3) глубинный, толщиной несколько сотых миллиметра, со сжимающими напряжениями, возникшими как реакция на растягивающие напряжения срединных слоев.

При обработке резанием металлов, склонных к фазовым превращениям, нагрев в зоне резания может вызывать структурные превращения, связанные, как известно, с объемными изменениями кристаллической решетки металла. Поэтому в слоях со структурой, имеющей большой удельный объем, развиваются напряжения сжатия, а в слоях со структурой меньшего удельного объема — остаточные напряжения растяжения.

Учитывая вышесказанное, подробнее рассмотрим возникновение напряжений при лезвийной обработке [3].

При резании поверхностный слой металла нагревается, в связи с чем происходит его расширение (удлинение) на

$$\Delta l = \alpha l(\Theta_2 - \Theta_1),$$

где α — коэффициент линейного расширения обрабатываемого материала; l — длина слоя при точении, равная πD ; D — диаметр обрабатываемой поверхности; Θ_1 , Θ_2 — соответственно начальная и конечная температуры нагрева.

Наружный слой металла связан в единое целое с нижележащим, остающимся холодным слоем, он не может расшириться на Δl , поэтому в нем возникают внутренние напряжения сжатия

$$\sigma = \varepsilon E = \alpha E(\Theta_2 - \Theta_1), \quad (8.2)$$

где $\varepsilon = \Delta l/l$ — относительная деформация; E — модуль упругости обрабатываемого металла.

Таким образом, тепловые остаточные напряжения растяжения могут возникнуть в поверхностном слое только в том случае, если внутренние напряжения при нагревании, определяемые по формуле (8.2), превысят предел текучести данного материала и в нем произойдет термопластическая деформация. Это условие может быть выражено неравенством

$$\sigma = \alpha E(\Theta_2 - \Theta_1) > \sigma_T,$$

где σ_T — предел текучести обрабатываемого металла с учетом возможного упрочнения при обработке.

Пренебрегая температурой Θ_1 из-за ее относительной малости, получаем:

$$\Theta = \sigma_T / (\alpha E),$$

где Θ — температура нагрева металла поверхностного слоя, в случае превышения которой в нем возникают тепловые остаточные напряжения растяжения.

Тепловые остаточные напряжения растяжения в зависимости от температуры Θ нагрева поверхностного слоя могут быть рассчитаны по формуле [1]

$$\sigma = E \left(\alpha_{\Theta} \Theta - \frac{\sigma'_{\tau}}{E_{\Theta}} \right), \quad (8.3)$$

где α_{Θ} — коэффициент линейного расширения, соответствующий этой температуре; σ'_{τ} — предел текучести металла поверхностного слоя с учетом его упрочнения; E_{Θ} — модуль упругости обрабатываемого металла при данной температуре нагрева.

Формула (8.3) справедлива для случая, когда нагревание поверхностного слоя не вызывает фазовых превращений металла.

Итак, в зависимости от вида и режимов обработки в зоне резания возникают различные количество теплоты и напряженность силового поля, в результате чего в поверхностном слое изменяются уровень и знак остаточных напряжений (рис. 8.12). Уровень скоростей резания в значительной степени влияет на величину и распределение остаточных напряжений. При обработке со скоростями ниже 3 м/мин в поверхностном слое формируются практически только напряжения сжатия. По мере роста скоростей эти напряжения снижаются и появляются возрастающие растягивающие напряжения. Начиная с некоторого уровня скоростей (для стали 45 около 50 м/мин) снижается уровень как растягивающих напряжений, так и сжимающих. По мере роста износа увеличиваются растягивающие напряжения. Использование СОТС, снижающих трение режущего лезвия об обрабатываемый материал, примерно на 50 % снижает уровень остаточных напряжений. С ростом подачи растягивающие напряжения увеличиваются, но при этом несколько больше и глубина их залегания. При переходе от положительных передних углов к отрицательным растягивающие напряжения резко уменьшаются, но одновременно увеличивается глубина их

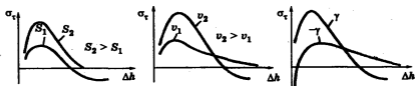


Рис. 8.12. Характер влияния условий резания на тангенциальные остаточные напряжения и глубину их залегания

залегания. Поэтому остаточные напряжения зависят от конкретных условий процесса обработки. Последние должны быть такими, чтобы обеспечить благоприятные остаточные напряжения, повышающие эксплуатационные характеристики деталей.

Процесс возникновения остаточных напряжений в закаленных сталях при шлифовании может быть представлен следующим образом [4]. Температура нагрева в поверхностном слое изменяется в соответствии с кривой *ABCDE* (рис. 8.13, *a*), причем в точке *A* на поверхности детали температура максимальна, а в точке *E* — минимальна. Максимальная температура при определенных условиях шлифования может приближаться к температуре плавления шлифуемого металла. В процессе шлифования слой 1, нагретый до температуры от точки *Ac₃* до $t_{\text{макс}}$, при последующем быстром охлаждении закалится вторично. Слой 2, нагретый до температуры от точки *Ac₁* до точки *Ac₃*, при охлаждении получит неполную закалку.

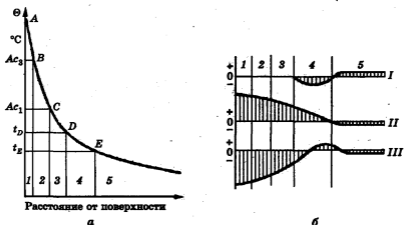


Рис. 8.13. Изменения температуры (*a*) и схема возникновения внутренних остаточных напряжений (*б*) в процессе шлифования закаленных сталей

Слой 3, нагретый до температуры точки *Ac₁*, получит отпуск, и мартенсит распадется. Непосредственно при шлифовании в слоях 1–3 внутренних напряжений не будет, так как нагретый металл является пластичным. В рассматриваемое время нагретый слой 4 стремится увеличить свой объем, но, будучи упруго связан со слоем 5, возрастет не на полную величину, обусловленную его темпера-

турным коэффициентом объемного расширения, а лишь частично. В результате слой 4 будет испытывать внутреннее сжимающее напряжение, а слой 5 — растягивающее (кривая I на рис. 8.13, б).

При охлаждении шлифованной поверхности до температуры t_D (ниже точки A_{c1}) пластичность металла (в слоях 1–3) резко снижается (металл имеет низкую упругость) и изменение объемов этих слоев не будет сопровождаться возникновением значительных внутренних напряжений. При весьма быстром охлаждении слоев 1–3 до температуры t_2 (близкой к 20°C) в этих слоях возникнут дополнительные внутренние напряжения (кривая I на рис. 8.13, б). Если в слоях 1 и 2 преобладает структура остаточного аустенита, а слои 3 и 4, имеющие относительно большую толщину, приобретут структуру троостита, то преобладающими окажутся остаточные напряжения растяжения (кривая II). Если в слоях 1 и 2 преобладает структура вторичной закалки, а толщина отпущенного слоя незначительна, то в детали преобладают напряжения сжатия (кривая III). Могут быть такие сочетания условий шлифования и свойств обрабатываемых сталей, при которых остаточные напряжения близки к нулю.

Напряжения σ , возникшие в поверхностном слое детали после шлифования, спустя некоторое время t (до 5 мин) полностью изменяют свою величину и знак (рис. 8.14). За это время успевают произойти все структурно-фазовые превращения в поверхностном слое, и его состояние стабилизируется.



Рис. 8.14. Кинетика напряженного состояния поверхностного слоя металла в ходе шлифования и после него

Высокие мгновенные температуры, развивающиеся при шлифовании, не только существенно влияют на формирование остаточных напряжений, но и могут привести к появлению прижогов и микротрещин. *Шлифовочный прижог* — местное изменение

структуры поверхностного слоя шлифуемой детали, возникающее в результате высоких мгновенных температур и интенсивного выделения теплоты на малых участках поверхностного слоя детали. Прижоги, сопровождающиеся мелкими трещинами, снижают твердость и износостойкость поверхностного слоя деталей, поэтому они являются одними из наиболее серьезных дефектов, имеющих место при шлифовании закаленных сталей.

Причинами появления прижогов могут быть:

- завышенный режим шлифования, вызывающий чрезмерно высокую нагрузку зерен шлифовального круга на обрабатываемый металл и интенсивный его нагрев;

- неправильно выбранный (слишком твердый) шлифовальный круг, также развивающий чрезмерно высокую нагрузку абразивных зерен на обрабатываемый металл;

- сильное затупление («засаливание») рабочей поверхности шлифовального круга металлической стружкой;

- недостаточное охлаждение при абразивном шлифовании твердых (закаленных) сталей;

- биение круга, погрешности установки деталей и др.

Возникновение шлифовочных трещин является результатом фазовых и структурных превращений, приводящих к определенным изменениям объема металла. Такие изменения, происходящие в поверхностных слоях детали, имеют различную интенсивность и глубину, неизбежно приводят к появлению внутренних напряжений разной величины и знака. Если внутренние напряжения превысят временное сопротивление металла, то образуются трещины (рис. 8.15).



Рис. 8.15. Шлифовочные трещины, выявленные при нанесении на поверхность детали магнитной суспензии [2]

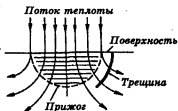


Рис. 8.16. Схема взаимного расположения одиночного прижога и трещины

Исследования показывают, что шлифовочные трещины образуются обычно у края отдельного прижога и огибают снизу обожженную зону (рис. 8.16). Как правило, трещина проходит по необожженной зоне металла. Это вызвано тем, что тепловые и структурные напряжения в отпущенном слое, имеющем структуру троостита и достаточную пластичность, приводят к небольшим пластическим деформациям. Напряжения в непластичной мартенситной структуре вызывают разрушение металла. В случае, если на небольшом участке поверхности возникает несколько прижоговых зон, образование и расположение трещин усложняется.

Литература

1. Каротин Б.С. Остаточные напряжения и их регулирование за счет режимов и методов механической обработки / Б.С. Каротин, Ф.П. Урывский // Технологические методы повышения точности, надежности и долговечности в машиностроении. М.: МДНТП, 1966.
2. Маслов Е.И. Теория шлифования материалов / Е.И. Маслов. М.: Машиностроение, 1974.
3. Маталин А.А. Технологические методы повышения долговечности деталей машин / А.А. Маталин. Киев: Техніка, 1971.
4. Подураев В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов / В.Н. Подураев. М.: Машиностроение, 1974.
5. Развитие науки о резании металлов / В.Ф. Вобров [и др.]; Под ред. Н.Н. Зорева. М.: Машиностроение, 1967.
6. Фельдштейн Е.Э. Финишная механическая обработка деталей из порошковых материалов / Е.Э. Фельдштейн, В.А. Николаев. Мн.: Выш. шк., 1987.

РЕГУЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ ПУТЕМ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА КОНТАКТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Резание с применением технологических

9.1. сред

9.1.1. Общие требования к технологическим средам

Применение при обработке резанием смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС) повыщает период стойкости режущего инструмента, уменьшает силы резания, улучшает качество обработанной поверхности детали, а следовательно, и ее эксплуатационные характеристики. Применение технологических сред — одно из основных направлений интенсификации процесса механической обработки различных материалов. !?

Все виды СОТС, несмотря на конкретные области их применения, должны удовлетворять следующим требованиям [7, 10]:

- 1) не снижать эксплуатационные характеристики деталей, изготовленных при их применении, прежде всего коррозионную стойкость и прочность;
- 2) быть устойчивыми при эксплуатации и хранении;
- 3) не воспламеняться при температурах, сопровождающих процесс резания;
- 4) не оказывать аллергического, дерматического или иного вредного воздействия на организм человека;
- 5) не выделять в процессе эксплуатации пену, дым, клейкие вещества, не смешиваться с машинными маслами;
- 6) не оказывать окрашивающего или коррозионного действия на узлы и механизмы станка.

9.1.2. Действие технологической среды в процессе резания

Смазочное действие. Цель применения СОТС — снижение интенсивности изнашивания режущего инструмента, улучшение ка-

чества обработанной поверхности и повышение производительности труда. Достичь этого можно направленным воздействием на элементарные физико-механические и химико-механические процессы, протекающие при резании металлов.

В результате смазочного действия технологической среды уменьшаются схватывание, фрикционный нагрев и силы трения при перемещении стружки и обрабатываемого металла по передней и задней поверхностям инструмента. В зависимости от свойств обрабатываемого и инструментального материалов СОТС могут уменьшать или увеличивать схватывание между ними, изменять длину контакта стружки с передней поверхностью и силы резания. Соответственно улучшаются или ухудшаются такие параметры обработки, как период стойкости инструмента, производительность процесса, качество обработанной поверхности и др.

Смазочное действие СОТС осуществляется в значительной степени за счет уменьшения реакционной способности образуемых в процессе резания ювенильных (новых, химически чистых) поверхностей. Эти поверхности характеризуются высокой физической и химической активностью, большими коэффициентами трения [1]. При отсутствии смазочной пленки наличие ювенильных поверхностей вызывает значительную адгезию, т.е. сцепление поверхностей контактирующих металлов. Вследствие этого резко возрастают силы трения, тепловыделение и т.д. Молекулы поверхностно- и химически активных веществ (ПАВ и ПХАВ), входящих в состав СОТС, адсорбируются на поверхности, снижают адгезию, уменьшают нарост. Вследствие уменьшения интенсивности адгезионных явлений уменьшается длина контакта стружки с передней поверхностью инструмента. Наиболее широко применяемые ПХАВ содержат атомы серы, фосфора, галогенов, группы ОН и СООН, высокомолекулярные органические и металлоорганические соединения.

По характеру взаимодействия с контактными поверхностями режущего лезвия и стружки образующиеся в процессе резания смазочные пленки можно разделить на физические, действующие при малых напряжениях на контактных площадках и температурах ниже 300 °С, и химические, действующие при высоких скоростях резания.

В первом случае назначение пленок заключается в нейтрализации силового поля физически чистых металлических поверхностей, образовании физических абсорбированных пленок (в результате действия сил Ван-дер-Ваальса) и в итоге уменьшении адгезии трущихся тел. На активность протекания физической абсорбции

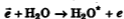
вливают концентрация вещества и температура. В частности, при низких температурах процесс протекает быстрее, так как отсутствует десорбция молекул. Концентрация же активных веществ может быть весьма незначительной.

При высоких скоростях резания процесс резания характеризуется хемосорбцией, т.е. быстротечными радикально-цепными реакциями на ювенильных поверхностях металлов. При хемосорбции вместо сил Ван-дер-Ваальса действуют химические связи, для образования которых требуется затратить большую энергию активации, чем при физической адсорбции. При хемосорбции молекулы жидкости или газовой среды распадаются на свободные атомы и радикалы, которые и образуют хемосорбированные слои. С увеличением температуры и при наличии катализаторов (которым может быть и обрабатываемый материал) скорость хемосорбции возрастает.

В зависимости от химического потенциала внешней среды, режимов резания, химических составов контактирующих материалов и многих других факторов на различных участках площадок контакта образуются соединения разных типов. Условно это расположение показано на рис. 9.1, а действие СОТС — на рис. 9.2.

Пленки, образуемые в результате адсорбции, тонкие, иногда мономолекулярные. Молекулы располагаются в определенном порядке, образуя своего рода кристаллическую решетку; чрезвычайно прочно связанную с металлом.

Рассмотрим процессы создания смазочных пленок более подробно. Известно, что ювенильные поверхности проявляют высокую активность к физической адсорбции и химическим реакциям, легко амальгамируются, характеризуются высокими коэффициентами трения [5]. Кроме того, они излучают поток электронов, особенно значительный непосредственно в момент образования. В результате взаимодействия электронов и молекул внешней среды образуются неустойчивые частицы — свободные атомы и радикалы, т.е. СОТС переходит в своего рода «плазменное» состояние, не имеющее ничего общего с ее исходным состоянием. Например, взаимодействие паров воды, составляющей основу подавляющего большинства жидких СОТС, и йода с электронами можно описать следующими уравнениями:



↓





$$\downarrow$$


где \bar{e} — электрон, эмитируемый ювенильной поверхностью стружки; H_2O^* , I_2^* — возбужденные молекулы воды и йода; H_\cdot , OH_\cdot , I_\cdot — радикалы; H_2O_2 — перекись водорода.

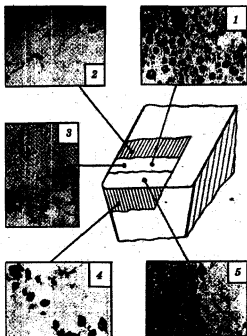


Рис. 9.1. Схема расположения пленок на контактных площадках инструмента:

1 — MeCl_2 ; 2 — Me_xO_y ; 3 — MeS ; 4 — Me_xO_y ; 5 — MeJ_2

При низких температурах ювенильные поверхности имеют свободные валентности, поэтому образование радикалов может происходить вследствие механического разрушения молекул:



где v — свободная валентность на ювенильной поверхности; O_2 — молекула адсорбированного кислорода; $v\text{OO}\cdot$ — перекисный радикал.



Рис. 9.2. Некоторые направления действия СОТС при резании металлов (R — радикалы)

Подобные радикалы весьма легко вступают в химические реакции, образуя оксиды металлов, действующие как твердые смазочные вещества.

На рис. 9.3 приведены классификация радикалов, образующихся при разложении смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ), и основные способы активации этого разложения. Области рационального применения таких радикалов указаны в табл. 9.1.

Таблица 9.1
Оптимальные области применения различных радикалов [5]

Область применения (обрабатываемый материал)	Применяемые радикалы	Способ активации СОЖ
Алюминиевые и магниевые сплавы	R2 - R5	A1, A3, A5, A7, A8
Стали и чугуны	R2 - R5, R10 - R12	A1, A3, A5, A7, A8
Жаропрочные никелевые сплавы	R10 - R12, R16	A2, A6 - A8
Титановые сплавы	R1, R7 - R9	A4, A6 - A8
Молибденовые сплавы	R6, R13 - R16	A1, A4, A6 - A8

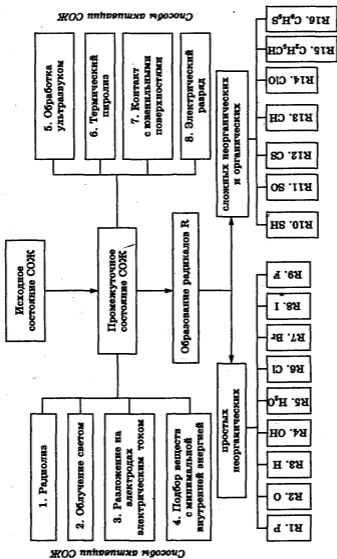


Рис. 9.3. Способы активации СОЖ и образующиеся при этом радикалы

Современные СОТС часто содержат большое количество ПХАВ, образующих на контактных площадках сложные химические соединения в виде тончайших пленок. Коэффициенты трения между такими пленками значительно меньше, чем между металлическими поверхностями, и смазочное действие СОТС становится более эффективным. Смазочное действие по-разному влияет на процесс резания. При лезвийной обработке углеродистых и легированных сталей в зоне низких скоростей резания повышение смазочных свойств СОТС стабилизирует нарост, уменьшает его размеры, прочность и силу сцепления между отдельными слоями. В случае нестабильного наростообразования интенсифицируется абразивное изнашивание инструмента. Поэтому если нарост оказывает защитное действие, например при резании инструментами из быстрорежущих сталей, то использование СОТС может отрицательно сказаться на их стойкости [11]. С увеличением толщины среза и скорости резания влияние СОТС снижается.

При шлифовании смазочное действие способствует повышению периода стойкости круга, позволяет избежать налипов, сократить цикл обработки путем увеличения бесприжоговой подачи.

Охлаждающее действие. В результате этого действия изменяется температурное поле инструмента, заготовки, стружки, что влияет на период стойкости инструмента, точность обработки, шероховатость и остаточные напряжения в поверхностном слое, форму стружки. При лезвийной обработке это наблюдается, когда скорость резания менее 150 м/мин, а при более высоких скоростях температура обрабатываемой заготовки стабилизируется.

Снижение температуры резания в случае применения СОТС обеспечивается за счет активного теплоотвода с не занятых стружкой рабочих поверхностей инструмента и, в меньшей степени, с самой стружки. Исходя из прямой взаимосвязи температуры резания и периода стойкости инструмента, можно прогнозировать положительное влияние охлаждения. Однако в результате этого процесса может разупрочняться режущая часть инструмента при прерывистом резании в результате колебаний температуры, образовываться растягивающие напряжения в поверхностном слое, могут увеличиваться силы резания. Кроме того, при определенных режимах резания может возрастать износ инструмента из-за смещения экстремума интенсивности изнашивания в зону более высоких скоростей резания (рис. 9А).

Теплообмен с СОТС уменьшает радиус завивания стружки, так как приводит к разным тепловым удлинением ее наружной и прирезцовой сторон. В целом охлаждающее действие уменьшается с увеличением толщины среза и скорости резания.

СОТС с высокими охлаждающими свойствами уменьшает температуру резания на $100...150^{\circ}\text{C}$.

Можущее действие. Оно определяется степенью очистки обрабатываемой детали и инструмента в зоне резания от шлама, содержащего мелкие частицы стружки, обрабатываемого металла, инструментального материала, которые удерживаются на поверхности твердых тел электростатическими, электромагнитными и механическими силами. Чем меньше частицы шлама, тем легче они проникают в микронеровности на поверхности инструмента и детали и тем прочнее там удерживаются, ухудшая технологические показатели процесса обработки.

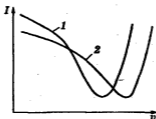


Рис. 9.4. Зависимость интенсивности изнашивания инструмента от скорости резания:

1 — без охлаждения; 2 — с охлаждением

Эффективным моющим действием обладают вещества, хорошо смачивающиеся и адсорбирующиеся на границе раздела металл — жидкость и уменьшающие поверхностное натяжение жидкости. Образующиеся при этом пленки уменьшают адгезию шлама к поверхностям инструмента и детали. К поверхностно-активным веществам, обладающим моющим действием, относятся сульфаты, сульфанола, мыла, высшие жирные спирты и др. Повышение моющего действия СОТС можно обеспечить за счет увеличения скорости потока и расхода жидкости, подаваемой в зону резания в единицу времени.

Моющим действием можно назвать также удаление частиц стружки с базировочных и крепежных элементов автоматизированного оборудования, на которые подается жидкая технологическая среда под давлением из специальных сопел перед установкой обрабатываемой детали.

Режущее и пластифицирующее действие. Под «режущими» свойствами СОТС понимают ее способность облегчать разрыв свя-

зей в обрабатываемом материале при внедрении инструмента. Это способствует повышению стойкости инструмента и облегчению процесса резания. Пластифицирующее действие СОТС заключается в облегчении пластического деформирования металлов за счет локализации деформации в тонких поверхностных слоях. Эти слои выполняют роль смазочного материала и препятствуют налипанию обрабатываемого металла на инструмент, уменьшают трение на контактных площадках и силу резания.

Режущее и пластифицирующее действие вызывается совокупностью физических явлений. К ним, в частности, относится эффект П.А. Ребиндера. Он заключается в понижении прочности твердых тел в адсорбционно-активной среде вследствие физических и химических взаимодействий в поверхностном слое. Молекулы некоторых адсорбированных на поверхности веществ обладают высокой активностью; они весьма подвижны и стремятся растечься тончайшим слоем (подобно нефти на поверхности воды). Распространяясь по поверхности, эти молекулы проникают в микротрещины. В глубине, там, где из-за недостаточной ширины щели молекулы не могут проникнуть дальше, они производят сильное распирающее действие (рис. 9.5), которое равноценно действию приложенных к телу дополнительных растягивающих усилий.

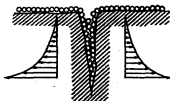


Рис. 9.5. Эпюра расклинивающих напряжений в микротрещине

Чем уже щель, тем сильнее расклинивающее действие; заметный эффект получается при ширине не более 0,1 мкм; при ширине, равной 1 мкм, давление составляет около 0,15 МПа, а при ширине около $1 \cdot 10^{-5}$ мм (чему соответствует мономолекулярный слой на обеих поверхностях щели) оно возрастает до 150 МПа. Минимальная ширина щели, куда может проникнуть жидкость, равна двум диаметрам молекул жидкости, т.е. примерно $(6 \dots 10) \cdot 10^{-6}$ мм; при этом обе стенки трещины будут покрыты только одним слоем молекул.

Благодаря такому дополнительному воздействию заметно снижается номинальное напряжение, отвечающее возникновению текучести (например, для олова — почти в 2 раза). Адсорбированные

вещества проникают по микрощелям, идущим вдоль плоскостей скольжения в отдельных зернах, создавая внутреннюю смазку, облегчающую деформацию обрабатываемого материала. При переменных нагрузках чередуются раскрытия и смыкания щелей, причем адсорбированные слои выдавливаются, но все же не полностью, поскольку остатки адсорбированного вещества мешают полному смыканию микротрещин. Последовательные раскрытия и смыкания приводят к росту трещин и разрыхлению поверхностного слоя.

При попадании поверхностно-активных компонентов жидкости в зону предельно деформированного срезаемого слоя возможно распадение ее на атомы азота, водорода, кислорода, которые внедряются в кристаллическую решетку наиболее сильно деформированных зерен металла. В результате металл упрочняется и переходит в хрупкое состояние. При этом уменьшаются предельная пластическая деформация перед разрушением и удельная работа резания.

В зоне первичных пластических деформаций пластифицирующее действие среды проявляется вследствие диффузии компонентов термического распада СОТС в искаженную кристаллическую решетку деформируемого металла.

Защитное и упрочняющее действие. СОТС способствует повышению эксплуатационных характеристик деталей. Высоким защитным действием обладают, в частности, инертные газы. Обработка в их атмосфере титановых сплавов предохраняет поверхностный слой от разупрочнения в результате диспергирования в него атомов азота, водорода, кислорода. Это существенно повышает прочность сплавов при циклических нагрузках. В ряде случаев путем правильного подбора компонентов технологической среды можно нанести на поверхность детали пленку ингибиторов коррозии.

При использовании некоторых СОТС обеспечивается упрочнение поверхностного слоя детали в результате измельчения внутризеренной структуры его кристаллической решетки в поверхностно-активной среде.

9.1.3. Разновидности технологических сред и области их применения

Номенклатура технологических сред, используемых при обработке металлов резанием, чрезвычайно разнообразна. Среди них жидкие, пластичные, твердые и газообразные вещества. К жидким технологическим средам относятся [10]: водные растворы органических и неорганических веществ; растворы эмульсолов, образующих в воде грубые дисперсии или микро-

эмульсии; масла различной вязкости; быстронагревающиеся жидкости; расплавы металлов, солей и других веществ.

В состав жидких технологических сред входят присадки на основе животных или растительных жиров, органических кислот, содержащие соединения серы, фосфора, галогенов и других активных элементов, а также растворимые полимеры, комплексные металлоорганические соединения и другие вещества. Использование присадок оказывает многостороннее воздействие на физические процессы, происходящие в зоне резания. Жидкие среды используются при всех видах лезвийной и абразивной обработки, снижая интенсивность изнашивания, уровень сил резания, повышая качество обработанной поверхности. Рекомендации по их применению с учетом обрабатываемого материала, вида обработки и процентного содержания концентрата в воде приведены в справочной литературе [2, 10].

Расплавы легкоплавких металлов являются эффективными технологическими средами, позволяющими обрабатывать высокопрочные материалы, не поддающиеся резанию с другими СОТС, или материалы с низкой обрабатываемостью [2, 9]. Расплавы способствуют уменьшению сил резания и интенсивности изнашивания инструментов, причем зависимость $T = f(v)$ имеет экстремальный характер. Эффективность действия расплавов с ростом скорости резания снижается. Это связано с затруднением попадания расплава в зону разрушения и достижением предела теплостойкости инструментального материала.

Наряду с высокими смазочными и охлаждающими свойствами особенностью металлических расплавов является их высокая поверхностная активность. Оказывая, как и все ПАВ, режущее и пластифицирующее действие на процесс резания, они вызывают снижение прочности обрабатываемого материала в результате снижения поверхностной энергии на межфазной границе. Например, при сверлении труднообрабатываемых материалов жидкий поверхностно-активный металл влияет на характер стружкообразования, изменяя пластичность срезаемого слоя. Стружка при этом резко измельчается и приобретает форму мелких иголок шириной около 0,1 мм, взвешенных в жидком металле.

В качестве жидких расплавов используют сплав Вуда, эвтектические сплавы типа олово + цинк, олово + свинец, висмут + кадмий, кадмий и др. Общий недостаток использования расплавов — необходимость подогрева среды и обеспечения минимально допустимой подачи расплава в зону резания. Поэтому иногда вместо

жидкометаллических сред применяют суспензии порошков металлов. В качестве среды для приготовления суспензии можно использовать масла или водоэмульсионные СОТС.

Промежуточное положение между твердыми смазочными материалами и маслами занимают пластичные смазочные вещества. Они состоят из двух компонентов: жидкой основы (масел различных видов) и загустителя. Кроме того, в их состав входят различные присадки и наполнители (например, графит, дисульфид молибдена, порошкообразные металлы [10]), которые повышают смазочные и другие свойства паст. Характерные для них условия работы — малые скорости резания, при которых достаточно периодического смазывания инструмента. Это касается, в частности, нарезания резьб, протягивания, развертывания, полирования и т.д. Пластичные смазочные материалы применяют на оборудовании, где отсутствует система охлаждения, а также в тех случаях, когда по технологическим или санитарно-гигиеническим условиям невозможно применение жидких сред.

В этих же случаях используют твердые смазочные материалы. Наибольший эффект достигается при обмазке ими лезвий сложного фасонного режущего инструмента, например протяжек, червячных фрез, резовых головок, метчиков. Нанесенная пленка должна иметь достаточную механическую прочность, высокую адгезию, эластичность и образовывать на поверхности металла непрерывный слой. Для введения твердых смазочных материалов в зону обработки используют специальные брикеты или карандаши, распыление, окунание в суспензии.

Из твердых смазочных материалов широкое распространение получил дисульфид молибдена, но можно использовать и другие вещества, например графит, йодиды, сульфиды и селениды металлов, нитрид бора. Смазочное действие в этом случае обеспечивается за счет своеобразной структуры этих материалов. Их кристаллическая решетка состоит из множества параллельных слоев. Связь между атомами внутри слоя значительно сильнее, чем между атомами, расположенными в соседних слоях. В результате слой легко скользит относительно друг друга.

Использование твердых смазочных материалов иногда лимитируется химическими реакциями, происходящими при высоких температурах. Например, при температурах свыше 400 °С дисульфид молибдена MoS_2 превращается в MoS_3 , имеющий не смазывающие, а абразивные свойства.

Газообразные технологические среды применяются в тех случаях, когда по условиям технологического про-

цесса не допускаются к применению жидкие среды. При высоких скоростях резания газы обладают значительно большей проникающей способностью, чем жидкости. Они оказывают влияние на процессы, происходящие на контактных площадках, особенно при резании труднообрабатываемых материалов. Газовые среды могут обладать защитным или смазочным действием. В первом случае используются инертные газы (гелий, аргон). При обработке материалов, имеющих большое химическое сродство с кислородом и азотом, например титановых сплавов, на обработанной поверхности образуется охрупченный слой, и сопротивление деталей усталости резко снижается. Резание в среде аргона позволяет значительно повысить прочность деталей из титановых сплавов при переменных нагрузках.

В отличие от инертных активные газы (сероводород, хлор, кислород, углекислый газ) образуют на поверхностях заготовки и инструмента защитные пленки, снижающие интенсивность изнашивания и наростообразования и шероховатость обработанной поверхности.

В отдельных случаях газовые СОТС применяют в сжиженном виде для глубокого охлаждения обрабатываемых материалов. При этом металл переводится из вязкого состояния в хрупкое, резко уменьшается работа пластической деформации. Глубокое охлаждение особенно эффективно при обработке труднообрабатываемых и вязких сталей [12].

9.1.4. Способы ввода технологической среды в зону резания

При подаче СОТС в зону резания она практически мгновенно падает на площадки контакта рабочих поверхностей инструмента со стружкой и деталью. Проникновение это происходит под влиянием сил химического взаимодействия и через сеть субмикроскопических трещин и капилляров в зоне стружкообразования и на контактных площадках. Так, плексигласовый резец с полированными поверхностями может резать олово, свинец и другие мягкие материалы. Если нанести каплю окрашенной воды сбоку от места контакта стружки с передней поверхностью резца, можно заметить, как жидкость, быстро всасываясь, проникает в зону контакта и смачивает поверхности контактных площадок.

Возможные пути проникновения внешней среды в щелевые зазоры между режущим лезвием и стружкой весьма разнообразны. Это,

в частности, может происходить вследствие образования тончайшей сетки капилляров в зоне контакта стружки с передней поверхностью и возникновения капиллярного эффекта. При обработке с низкими и средними скоростями резания контакт стружки с инструментом имеет точечный характер. В сечении, перпендикулярном к режущей кромке, формируются микронеровности и образуются капилляры размером 0,4...4 мкм, обеспечивающие постоянное поступление СОЖ, в том числе молекул жирных кислот, или ее паров на трущиеся поверхности. При этом скорость движения жидкости достигает 3...4 м/с. При скоростях резания свыше 100 м/мин контактная поверхность стружки сильно пластифицирована и размеры капилляров многократно уменьшаются. Смазывание в этом случае осуществляется воздухом или продуктами разложения СОЖ.

Другим механизмом, способствующим проникновению СОЖ, является вакуумный эффект вследствие высокочастотных разрушений наростов и колебательных процессов, имеющих место в зоне резания (см. § 4.3, 5.6).

Еще один возможный путь проникновения молекул или ионов СОЖ — через толщину деформированной стружки или по плоскостям сдвига. Установлено, что вследствие наличия микротрещин и разрывов в зоне первичных деформаций плотность металла стружки на 2...3 % меньше плотности исходного материала.

Проникающее действие среды зависит как от ее физических свойств (размеры молекул и ионов, агрегатное состояние), так и от способа ее подвода в зону резания. Так, лучшему проникновению среды на тяжело нагруженные контактные поверхности способствует подача СОТС под давлением, которая имеет дополнительную кинетическую энергию.

Эффективность применения СОТС и экономические показатели их использования в значительной степени определяются способом подвода в зону обработки. Наибольшее разнообразие их используется при подаче СОЖ. Самое широкое распространение получила подача СОЖ свободно падающей струей (рис. 9.6, а) под давлением 0,02...0,03 МПа, что объясняется в первую очередь простотой реализации способа. Его эффективность зависит от расхода СОЖ, размеров, формы и траектории струи. Последняя в любом случае должна перекрывать всю зону контакта инструмента с заготовкой.

При использовании указанного способа подачи СОЖ необходимо соблюдать следующие требования [12]:

1) жидкость должна подводиться непрерывной струей с первого момента резания;

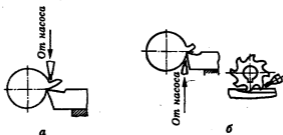


Рис. 9.6. Подача СОЖ свободно падающей струей (а) и через сопловые насадки (б)

2) расход жидкости должен быть достаточно большим, но не более 15 л/мин, так как его дальнейшее увеличение нецелесообразно. С повышением давления жидкости период стойкости инструмента увеличивается, но до определенного предела. При различных видах обработки требуется разный расход охлаждающей жидкости. Так, например, при точении и сверлении рекомендуется подводить 10...12 л/мин жидкости, фрезеровании — 10...20, черновых зуборезных работах — 8...10, чистовых — 2...3, при протягивании — 10...12 л/мин;

3) характер подвода, направление и форма струи должны быть отрегулированы в соответствии с проводимой обработкой. Например, при нарезании резьбы с большой скоростью СОЖ должна подаваться обильной струей. Струю направляют в то место, где отделяется стружка. Это позволяет отводить наибольшее количество теплоты;

4) необходимо следить за состоянием и расходом СОЖ, своевременно менять ее и доливать в баки. Предельный срок работы эмульсии при обработке стали достигает 30, а чугуна и латуни — 15 дней.

Подача СОЖ под давлением 0,1...2 МПа через сопловые насадки (рис. 9.6, б) применяется в целях увеличения расхода СОЖ, проходящей через зону обработки, и вымывания из этой зоны стружки. Последнее обстоятельство особенно важно для автоматизированного оборудования. Разновидностью подачи СОЖ под давлением является струйно-напорный способ. В этом случае тонкую струю СОЖ направляют в зону контакта инструмента с заготовкой со стороны задней поверхности лезвия. Эффективность подачи СОЖ под давлением значительно выше, чем при поливе (свободно падающей струей), однако этот способ сложнее и дороже. Подача

жидкости осуществляется с помощью насосов через фильтр и гибкий шланг с насадкой, имеющей отверстие диаметром 0,4...0,6 мм. Расстояние от выходного отверстия до лезвия реза должно быть как можно меньше, чтобы уменьшить рассеивание струи. К недостаткам высоконапорного охлаждения следует отнести необходимость точного и непрерывного попадания струи в зону резания, сложность защиты от брызг, необходимость оснащения станка специальным насосом. При охлаждении такого вида период стойкости резцов из быстрорежущей стали возрастает в 3–7 раз по сравнению с использованием обычного охлаждения и в 10–20 раз по сравнению с точением всухую. Применение высоконапорного охлаждения при обработке резцами, оснащенными твердым сплавом, менее эффективно. Период стойкости таких резцов возрастает лишь в 1,5 раза по сравнению с обычным охлаждением, да и то не всегда.

При использовании станков с ЧПУ получила распространение подача СОЖ в распыленном состоянии (рис. 9.7). В этом случае СОЖ с помощью сжатого воздуха распыляется на мельчайшие капельки и вместе с воздухом в виде тумана с большой скоростью (до 200...300 м/с) подается в зону резания. Расход жидкости очень мал. Период стойкости инструмента повышается в 2–4 раза по сравнению с обычным охлаждением свободно падающей струей и в 2 раза по сравнению с высоконапорным охлаждением. Кроме того, охлаждение распыленной жидкостью более удобно, так как не требует точного направления струи.

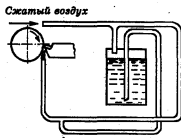


Рис. 9.7. Подача СОЖ в распыленном состоянии

Высокая эффективность СОЖ в распыленном состоянии объясняется следующим:

1) скорость истечения струи воздушно-жидкостной смеси составляет примерно 300...330 м/с, что в 300 раз больше скорости свободно падающей струи при охлаждении поливом; такая ско-

рость способствует интенсивному конвективному теплообмену между двухфазной струей и охлаждаемой зоной (нагретой поверхностью детали или режущего инструмента);

2) температура смеси при выходе из сопла находится в пределах $3...12^{\circ}\text{C}$ и может быть даже ниже нуля, что также повышает интенсивность конвективного теплообмена;

3) попадая на нагретую поверхность, частицы СОЖ превращаются в пар, отбирая с единицы поверхности значительное количество теплоты; в то же время струя воздушно-жидкостной смеси обладает достаточной кинетической энергией, чтобы быстро разрушать возникающую в охлаждаемой зоне паровую оболочку;

4) частицы распыленной СОЖ, обладая относительно большой кинетической энергией и значительным избытком свободной энергии, интенсивно проникают в зону контакта режущего инструмента с обрабатываемой деталью, в результате чего улучшается смазочная способность СОЖ;

5) вместе с частицами СОЖ в зону резания поступает и воздух, благодаря чему трущиеся поверхности взаимодействуют не только с СОЖ, но и с кислородом воздуха; при этом на поверхности металла образуются пленки оксидов, усиливающие слой защиты от непосредственного контакта трущихся поверхностей.

Следует отметить, что расход масел в десятки раз меньше, чем расход СОЖ на водной основе — соответственно 1...5 и 200...400 г/ч.

При этом:

□ частицы распыленной СОЖ имеют размеры от 1 до 150 мкм (средний размер 12...25 мкм);

□ расстояние между каплями — более 25 их диаметров;

□ через поперечное сечение струи за секунду проходит несколько сот миллионов капель;

□ удельная поверхность распыленной СОЖ в 700 раз больше, чем жидкости.

При обработке отверстий стержневыми инструментами широко применяется подача СОЖ под давлением через каналы в теле инструмента с выходом в зону резания (рис. 9.8). В результате облегчается не только надежный подвод СОЖ к контактным площадкам, но и удаление стружки из этой зоны. Такой способ охлаждения даже при обработке высокопрочных сталей позволяет увеличивать скорость резания на 25...40 %. Для подачи жидкости через внутренние каналы вращающихся инструментов применяются специальные патроны. Период стойкости сверл с внутренним подводом СОЖ повышается в 3–10 раз по сравнению с обычными сверлами.

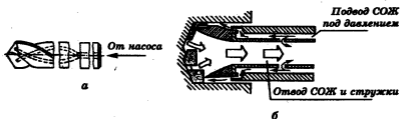


Рис. 9.8. Подача СОЖ через каналы в теле инструмента с выходом в зону резания:

а — спиральное сверло; *б* — эжекторное сверло

Аналогичные явления наблюдаются при подаче СОЖ через поры и каналы в шлифовальном круге за счет действия центробежных сил (рис. 9.9).

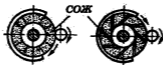


Рис. 9.9. Подача СОЖ через поры и каналы в теле шлифовального круга

При токарной обработке иногда используют подачу СОЖ через каналы в инструменте без выхода ее в зону резания (рис. 9.10, *а*). В этом случае СОЖ выполняет только функцию охлаждения. Разновидностью такого способа является использование для охлаждения тепловых труб (рис. 9.10, *б*). В общем случае они представляют собой герметичные контейнеры, внутренняя поверхность стенок которых покрыта слоем капиллярно-пористого материала, называемого фитилем [8]. После создания в тепловой трубе вакуума фитили 2 заполняют рабочей жидкостью, например ацетоном. Тепловая труба работает следующим образом. Теплота, подведенная к наружному концу трубы, будет поглощаться в виде скрытой теплоты парообразования при испарении рабочей жидкости. Поглощенная теплота переносится паром к холодному концу трубы 3, где происходит конденсация пара. Образующаяся при конденсации жидкость под действием капиллярных сил возвращается по порам фитиля к горячему концу тела резца 1. Использование тепловой трубы позволяет уменьшить температуру резания на 200 °С и бо-



Рис. 9.10. Подача СОЖ через каналы в теле инструмента без выхода в зону резания:

a — резец с каналом; *b* — резец с тепловой трубой

лее, повысить период стойкости резца более чем вдвое. Твердые смазочные материалы вводятся в зону резания в результате периодической или непрерывной обмазки рабочих поверхностей инструмента. При шлифовании хорошо зарекомендовали себя круги, пропитанные такими материалами, как сера, углеводородные и кремнийорганические соединения [6].

Резание инструментами с улучшенными эксплуатационными свойствами

9.2.

9.2.1. Способы улучшения режущих свойств инструментов

В инструментальном производстве широко используются различные способы улучшения режущих свойств инструментальных материалов, которые условно можно разделить на три группы:

1) позволяющие улучшить структуру и свойства материала путем устранения вероятных недостатков термической обработки или вредных последствий шлифования и затачивания инструментов;

2) повышающие износостойкость и теплоустойчивость режущей части инструмента путем изменения состава и свойств ее тончайших поверхностных слоев;

3) формирующие на поверхностях инструмента тонкие пленки иного химического состава, а также физических и механических характеристик.

К первой группе относится обработка инструмента при температурах ниже нуля (о б р а б о т к а х о л о д о м): охлаждение инструментов после закалки до температуры $(-75...-80)^\circ\text{C}$ и выдержка при такой температуре в течение 1 ч. Благодаря переводу остаточного аустенита в мартенсит и исправлению возможных отклонений в осуществлении самого выгодного режима термической обработки (пе-

регрев при закалке, недостаточный отпуск и т.д.) обработка холодом в некоторых случаях позволяет повысить период стойкости инструмента в 1,5–2 раза.

К этой же группе относятся способы, позволяющие предотвратить ухудшение качества поверхностных слоев инструментов вследствие шлифования и заточки. При шлифовании и заточке, особенно если они производятся без соблюдения необходимых предосторожностей, на обрабатываемых поверхностях инструментов действует очень высокая температура. Эти поверхности «прижигаются», т.е. отпускаются, и теряют высокие твердость и износостойкость. Такие участки подвержены ускоренному изнашиванию, на них налипает обрабатываемый материал. В результате шлифования и заточки в поверхностных слоях инструментов нередко возникают остаточные напряжения, приводящие к образованию чрезвычайно мелких трещин, которые могут служить причиной выкрашивания режущих кромок.

Одним из способов устранения указанных дефектов является травление (химическая обработка) заточенных инструментов в водном растворе кислот и медного купороса: с поверхности удаляется слой отпущенного металла толщиной 5...20 мкм, что способствует повышению периода стойкости инструмента на 30...50 % и уменьшению налипания обрабатываемого металла.

Обработка холодом и химическая обработка используются для повышения режущих свойств инструментов из быстрорежущих сталей.

К первой группе способов повышения стойкости режущих инструментов относится также удаление поврежденного при заточке слоя с рабочих поверхностей инструментов путем доводки этих поверхностей, т.е. обработки с помощью доводочных паст или мелкозернистых шлифовальных кругов. Доводка обычно используется для повышения режущих свойств инструментов, оснащенных твердым сплавом.

Ко второй группе способов, повышающих износостойкость и теплоустойчивость режущей части быстрорежущего инструмента, относятся:

□ **ц и а н и р о в а н и е**; обеспечивает повышение твердости поверхностного слоя до 69...72 HRC и теплоустойчивости примерно на 50 °С. Период стойкости инструмента возрастает в 1,5–3 раза;

□ **с у л ь ф и д и р о в а н и е**; уменьшает силы трения стружки и детали об инструмент и приводит к некоторому повышению его стойкости;

□ **х р о м и р о в а н и е**; слой хрома толщиной 3...5 мкм, имеющий твердость около 70 HRC, не только увеличивает износостойкость инструмента, но и уменьшает налипание обрабатываемого металла.

Вследствие этого хромирование инструмента дает особенно хорошие результаты при обработке легких сплавов (алюминия, силумина и т.д.), а также мягких вязких сталей и пластмасс;

□ обработка перегретым паром; уменьшает слипание и схватывание поверхности инструмента с обрабатываемым металлом и благодаря мельчайшим порам лучше удерживает СОЖ. Дополнительный отпуск, которому инструмент подвергается при обработке паром, снимает остаточные напряжения, вызываемые шлифованием и заточкой.

Наряду с традиционными способами упрочнения поверхностного слоя используются новые: радиоактивное облучение, светолучевая обработка. В результате облучения металлов нейтронами, электронами, тяжелыми ионами, γ -лучами существенно изменяются их механические свойства, возрастает прочность, твердость, снижается пластичность. Это вызвано нарушениями правильности кристаллической решетки, образованием вакансий, которые тормозят движение дислокаций, упрочняя материал. При облучении металлов ионами благородных газов образуется поверхностное покрытие. Радиоактивное облучение инструментов может привести к повышению периода стойкости инструментов в несколько раз, однако оно достаточно дорогое и характеризуется остаточной радиоактивностью, что препятствует его практическому использованию.

Более экономично упрочнение быстрорежущих сталей светолучевой (лазерной) обработкой. В этом случае в поверхностных слоях инструмента происходят изменения микроструктуры, фазовый наклеп и другие явления, приводящие к повышению твердости материала и возрастанию его износостойкости.

Все рассмотренные выше методы улучшения свойств инструментальных материалов в настоящее время используются главным образом в производстве специальных режущих инструментов. Развитие же технологии производства универсальных инструментов из быстрорежущих сталей и оснащенных сменными пластинами из твердого сплава связано с нанесением на них твердых и износостойких пленок толщиной в несколько микрометров, обычно называемых **покрытиями** (третья группа способов). В качестве покрытий используются соединения углерода, азота, бора с переходными металлами, имеющие высокую температуру плавления, оксиды некоторых металлов, а также искусственные алмазы. Все соединения, используемые для нанесения покрытий, условно можно разделить на ионные, ковалентные и металлические. Некоторые их свойства приведены в табл. 9.2.

Таблица 9.2

Свойства материалов, используемых в качестве покрытий [14]

Материал	Температура плавления или разложения, К	Твердость HV	Модуль упругости, ГПа	Теплоемкость, Вт/(м·К)
<i>Ионные материалы</i>				
Al ₂ O ₃	2320	2100	400	-25
TiO ₂	2040	1100	200	9
ZrO ₂	2983	1200	200	1,5
SiO ₂	1973	1100	151	2
MgO	3100	750	320	—
<i>Ковалентные материалы</i>				
С (алмаз)	4073	8000	1050	1100
B ₄ C	2723	4000	660	—
Кубический нитрид бора (CBN)	3003	5000	440	—
SiC	3033	2600	480	84
Si ₃ N ₄	2173	1700	310	17
AlN	2523	1200	350	—
<i>Металлические материалы</i>				
ZrC	3718	2560	400	—
TiB ₂	3498	3000	560	30
TiC	3340	2800	460	34
TiN	3223	2100	590	30
TaC	4258	1600	560	23
WC	3049	2350	720	35
VC	2921	2900	430	—
<i>Инструментальные материалы</i>				
Быстрорежущая сталь	1673	900	250	50
Твердый сплав	-3023	1600	630	80

С целью обеспечения максимальной эффективности обработки используются покрытия, состоящие из многих слоев. Для их нанесения используются две группы технологических методов:

1) CVD (chemical vapour deposition) — химическое осаждение из газовой фазы;

2) PVD (physical vapour deposition) — физическое осаждение из газовой фазы.

В зависимости от обрабатываемого материала и условий обработки могут быть использованы следующие разновидности покрытий [13]:

□ базирующиеся на использовании слоев TiN, TiC и Ti(N,C), иногда с добавлением Al и Cr, например (Ti,Al)N;

□ керамические, в том числе Al_2O_3 ;

□ сверхтвердые, например CVD-алмазные;

□ имеющие очень низкий коэффициент трения, в том числе дисульфид молибдена, графит и аморфные соединения типа Me-C:H*.

В промышленности используются разновидности покрытий (табл. 9.3), созданные путем комбинаций различных одиночных слоев [13]:

□ однослойные толщиной 0,5...50 мкм;

□ традиционные многослойные со слоями различного функционального назначения и толщиной отдельных слоев 0,5...10 мкм;

□ многослойные с так называемой наноструктурой и толщиной отдельных слоев от нескольких до 100 нм;

□ градиентные с градиентом свойств (твердости) и химического состава;

□ сверхтвердые на базе поликристаллических искусственных алмазов или композитов на основе нитрида бора;

□ твердые смазки типа MoS_2 , графита и т.д.;

□ двухслойные типа твердая смазка Me-C:H + слой твердого материала.

Покрытие создает достаточно твердую и износостойкую поверхность при вязкой и прочной сердцевине режущего клина. Покрытие TiC отличается высокой твердостью (до 3000 HV), хорошим сцеплением с основой, стойкостью к окислению и повышает износостойкость прежде всего задней поверхности инструмента. Покрытия TiC не пригодны для обработки легких сплавов, поскольку на стойкости инструмента неблагоприятно сказывается химическое сродство алюминия, титана, входящих в состав обрабатываемого материала, и карбида титана, находящегося в твердом сплаве.







Покрытие TiN характеризуется практически полной инертностью к адгезии и высоким сопротивлением лункообразованию. В связи с технологическими особенностями нанесения это покрытие единственное, применяемое для быстрорежущих сталей. Покрытия других видов используются для нанесения на твердосплавные пластины.

Покрытие карбонитридом титана сочетает преимущества TiC (высокая износостойкость и сцепляемость с основой) и TiN (лучшая

* Me-C:H — общее обозначение высокомолекулярных металлоорганических соединений.

Таблица 9.3

Разновидности и назначение покрытий фирмы «Kennametal Hertel» [4]

Структура	Назначение	Структура	Назначение
 <p>TiN Твердый сплав</p>	Обработка жаропрочных сплавов с малыми и средними скоростями резания; покрытие PVD	 <p>TiN Al₂O₃ TiCN Твердый сплав</p>	Обработка стали и серого чугуна, в том числе с высокими скоростями резания; покрытие CVD
 <p>TiN TiCN TiC Твердый сплав</p>	Обработка стали с малыми и средними скоростями резания; покрытие CVD	 <p>Алмаз Твердый сплав</p>	Обработка цветных сплавов и пластмасс; покрытие CVD
 <p>TiN TiCN TiC Al₂O₃ TiN Твердый сплав</p>	Обработка нержавеющей стали и чугунов со средними скоростями резания; покрытие CVD	 <p>TiN TiCN TiN Твердый сплав</p>	Обработка жаропрочных и титановых сплавов; обработка с высокими скоростями; покрытие CVD/PVD

способность противостоять лункообразованию на передней поверхности). Покрытие выполняется многослойным с различным содержанием TiC и TiN в каждом из слоев: от чистого TiC снизу до почти чистого TiN в верхней зоне покрытия при общей его толщине 7...10 мкм. Многослойность обеспечивает достаточную вязкость покрытия, а высокая износостойкость по передней поверхности позволяет эффективно обрабатывать различные конструкционные материалы.

Весьма перспективным направлением является нанесение на твердосплавные пластины покрытий из керамики (Al_2O_3), двухслойных (TiC+ Al_2O_3), трехслойных (TiC + Al_2O_3 + TiN, TiC + TiN + Al_2O_3), которые имеют очень высокую износостойкость. Инструменты с покрытиями отличаются лучшими режущими свойствами, обеспечивая повышение периода стойкости в 3–5 раз или скорости резания на 10...30 % при неизменной стойкости по сравнению с инструментами без покрытия.

9.2.2. Особенности физических процессов резания инструментами с покрытиями

При резании инструментами с различными покрытиями сильное изменение условий внешнего трения приводит к значительному уменьшению длины полного и пластического контакта стружки с передней поверхностью, уменьшению размеров переходной пластически деформированной области. Наличие покрытия препятствует диффузионному взаимодействию инструментального и обрабатываемого материалов. Это увеличивает угол сдвига, уменьшает деформацию стружки и затрачиваемую на нее работу, а в итоге снижает энергозатраты на процесс формирования стружки [3].

Покрытие на 20...40 % снижает касательные напряжения на передней поверхности, тогда как нормальные напряжения изменяются в зависимости от соотношения нормальной силы и площади контакта. При значительном уменьшении длины контакта стружки с передней поверхностью максимальные контактные напряжения для инструмента с покрытием могут оказаться больше, чем без покрытия.

Увеличение радиуса округления режущей кромки при нанесении покрытия увеличивает упругое последствие, а значит, и длину контакта по задней поверхности.

С нанесением покрытия уменьшаются высота и длина подошвы нароста, значительно сужается диапазон скоростей устойчивого на-

ростообразования. Скорость резания, при которой образуется нарост максимальной высоты, смещается в область более высоких значений (рис. 9.11).

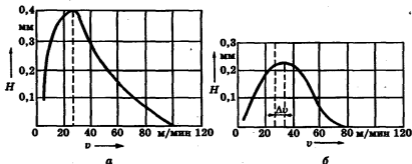


Рис. 9.11. Зависимость высоты нароста от скорости резания при точении стали 45 (HB 180) резцом ($S = 0,26$ мм/об, $t = 2$ мм):
а — из стали P6M5; б — P6M5+TiN

Тепловое состояние режущего инструмента является своеобразным индикатором, отражающим характер процесса резания. При наличии на контактных площадках инструмента сплошного покрытия снижается работа деформации и трения на передней и задней поверхностях, а следовательно, понижается интенсивность трех основных источников теплоты. Кроме того, покрытие, значительно отличаясь по своим теплофизическим характеристикам от инструментального материала, может изменять и регулировать направление и интенсивность тепловых потоков в инструмент, деталь, стружку и окружающую среду. В частности, увеличивается количество теплоты, отводимой со стружкой, и уменьшаются тепловые потоки в деталь и инструмент. Значительный разогрев стружки, несомненно, свидетельствует о температурном разупрочнении срезаемого слоя и снижении сопротивления сдвигу.

При нанесении покрытий на режущую часть твердосплавной пластины ее тепловое состояние существенно изменяется [3]. Температура инструмента снижается, а изотерма с максимальной температурой смещается в сторону режущей кромки и к задней поверхности (рис. 9.12). Последнее обстоятельство вызвано рассмотренными выше изменениями условий стружкообразования.

Такой характер расположения изотерм в режущей части инструмента позволяет объяснить факт снижения склонности твердо-

сплавного инструмента к лункообразованию и тенденцию к преобладающему изнашиванию задней поверхности реза.

С помощью покрытия замедляется развитие очагов активного изнашивания передней и задней поверхностей инструмента. Отсутствуют проточки и «усы» у краев контактных площадок инструмента. Вследствие этого устраняются источники интенсивного трения и тепловыделения.

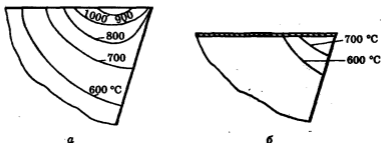


Рис. 9.12. Температурное поле реза из твердого сплава ВК6 (а) и ВК6+TiN (б) на передней поверхности при точении стали 35ХГСА (НВ 200) при $S=0,45$ мм/об, $t=2$ мм, $v=70$ м/мин

Процесс изнашивания быстрорежущих инструментов с покрытиями протекает в три стадии (рис. 9.13). В период приработки инструмента (стадия I) покрытие полностью сохраняет свою сплошность на передней и задней поверхностях инструмента и эффективно снижает интенсивность тепловыделения. Однако в результате действия адгезионно-усталостных процессов и срывов нароста происходит разрушение покрытия с образованием сетки хрупких трещин (стадия II). Но даже частично разрушенное покрытие продолжает сдерживать развитие очагов изнашивания по контактным площадкам. В дальнейшем разница между инструментами с покрытием и без него исчезает (стадия III) и наступает катастрофическое изнашивание. Покрытия на твердых сплавах не изменяют характер изнашивания, но распространяют его на область более высоких скоростей за счет снижения уровня термомеханической напряженности в зоне резания. При скоростях резания 20...100 м/мин наблюдается адгезионное изнашивание, а при 150 м/мин и выше — диффузионное, причем покрытие значительно повышает сопротивление твердосплавной матрицы диффузионному растворению в обрабатываемом материале.



Рис. 9.13. Схема разрушения покрытия TiN на инструментах из быстрорежущей стали в условиях активного наростообразования (А — зоны активных адгезивно-усталостных процессов)

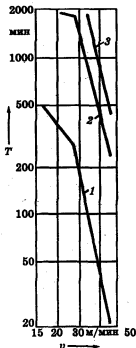


Рис. 9.14. Зависимость периода стойкости сверл диаметром 6 мм от скорости резания при обработке стали 45 (HB 180) при $S = 0,01$ мм/об:
 1 — из сплава ВК6;
 2 — ВК6 - TiC - TiCN - TiN;
 3 — ВК6 - (Ti - Cr)N

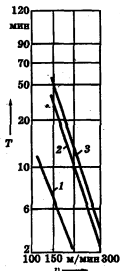


Рис. 9.15. Зависимость периода стойкости твердосплавных пластин от скорости резания при точении стали 45 (HB 180) при $S = 0,34$ мм/об, $t = 1$ мм:
 1 — из сплава ТТ10К8Б; 2 — ТТ10К8Б+TiN; 3 — ТТ10К8Б + TiC

За счет изменений интенсивности изнашивания инструменты с покрытием имеют в 2,5–5 раз более высокие периоды стойкости, чем инструменты без покрытий (рис. 9.14, 9.15).

Использование покрытий снижает уровень остаточных напряжений, степень наклепа, уменьшает вероятность структурно-фазовых превращений в поверхностном слое детали, несколько снижает шероховатость обработанной поверхности.

Литература

1. *Ахматов А.С.* Молекулярная физика граничного трения / А.С. Ахматов. М.: Физматгиз, 1963.
2. *Бердичевский Е.Г.* Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки материалов: Справочник / Е.Г. Бердичевский. М.: Машиностроение, 1984.
3. *Верещака А.С.* Режущие инструменты с износостойкими покрытиями / А.С. Верещака, И.П. Третьяков. М.: Машиностроение, 1986.
4. Каталог фирмы «Kennametal — Hertel» 501.00 GB. Turning Programme.
5. *Латышев В.Н.* Повышение эффективности СОЖ / В.Н. Латышев. М.: Машиностроение, 1975.
6. *Островский В.И.* Импрегнированный абразивный инструмент / В.И. Островский. М.: ВНИИТЭМР, 1989.
7. *Подураев В.Н.* Резание труднообрабатываемых материалов / В.Н. Подураев. М.: Машиностроение, 1974.
8. *Резников А.Н.* Резцы с автономной системой охлаждения / А.Н. Резников, Н.И. Живоглазов // Станки и инструмент. 1987. № 2. С. 18
9. *Резников А.Н.* Теплофизика процессов механической обработки материалов / А.Н. Резников. М.: Машиностроение, 1981.
10. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием: Справочник / Под ред. С.Г. Энтелиса, Э.М. Берлинера. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1995.
11. Технологические свойства новых СОЖ для обработки резанием / Под ред. М.И. Клушина. М.: Машиностроение, 1979.
- ✓ 12. *Худобин Л.В.* Техника применения смазочно-охлаждающих средств в металлообработке / Л.В. Худобин, Е.Г. Бердичевский. М.: Машиностроение, 1977.
13. *Klocke F.* Coated Tools for Metal Cutting — Features and Applications / F. Klocke, T. Kreig // Annals of CIRP. 1999. V. 48. № 2. P. 515–525.
14. *Wysiecki M.* Nowoczesne materiały narzędziowe / M. Wysiecki. Warszawa: WNT, 1997.

Абразивные и алмазные материалы

10.1. и инструменты

Абразивные инструменты изготавливаются в виде шлифовальных кругов различного профиля и размеров, брусков, пластин, шкурки. Абразивы используют также в виде порошков и паст.

При изготовлении кругов абразивные материалы имеют вид зерен. Они должны обладать высокой твердостью, иметь хорошую теплоустойчивость, а при затуплении — хорошо дробиться и образовывать новые острые лезвия. Все абразивные материалы делятся на две группы: *естественные* и *искусственные*. Естественные материалы не получили широкого применения из-за низких режущих свойств. Из искусственных абразивных материалов наиболее широко распространены электрокорунд, карбид кремния, карбид бора, синтетический алмаз, кубический нитрид бора.

Электрокорунд представляет собой кристаллический оксид алюминия Al_2O_3 , являющийся очищенным продуктом плавки глинозема (бокситов). Различают несколько видов электрокорунда: нормальный, белый, хромистый, титанистый и монокорунд.

Наибольшее применение получил *электрокорунд нормальный*. Выпускается он нескольких марок: 16А, 15А, 14А, 13А, 12А; применяется при черновом, получистовом и чистовом шлифовании сталей и чугунов, а также для заточки режущего инструмента из инструментальной стали.

Электрокорунд белый марок 25А, 24А, 23А, 22А превосходит по своим режущим свойствам электрокорунд нормальный, так как в нем содержится меньше примесей. Он применяется при шлифовании прочных и вязких сталей (незакаленных и закаленных), ковкого чугуна, заточки инструментов из быстрорежущей стали.

Электрокорунд хромистый марок 34А, 33А, 32А получают при плавке в электропечах глинозема с добавлением хромистой руды. Зерна его имеют розовую окраску. В нем содержится не менее 97 % Al_2O_3 и до 2 % CrO.

Электрокорунд титанистый 37А получают при плавке в электропечах глинозема с добавлением соединений титана. Выплавленный материал подвергается дроблению и просеиванию и содержит не менее 97 % Al_2O_3 и не менее 2 % TiO_2 .

Постоянство физико-механических свойств и высокая вязкость зерен электрокорунда хромистого и титанистого создают предпосылки для их использования при напряженных режимах шлифования углеродистых и конструкционных сталей, а также для высокоточных работ и доводочных операций.

Монокорунд марок 45А, 44А, 43А отличается высокой прочностью и более высокими режущими свойствами и содержит 97...98 % Al_2O_3 . Применяется он для обработки весьма прочных сталей, ковкого чугуна, быстрорежущей стали.

Карбид кремния представляет собой химическое соединение кремния с углеродом (SiC). Он изготавливается путем спекания в электропечах кварцевого песка с углеродом в виде кокса и выпускается двух видов: *черный* марок 55С, 54С, 53С, 52С и *зеленый* марок 64С, 63С, 62С. В настоящее время для упрощения используют обозначения карбида кремния зеленого и черного соответственно 6С и 5С, электрокорунда белого — 2А и т.д.

В черном карбиде кремния содержится 95...98 % SiC , в зеленом — 98...99 %. Более качественным, но и дорогим является зеленый карбид кремния. Он применяется для заточки твердосплавного инструмента. Черный карбид кремния хрупок и используется для обработки материалов с низким пределом прочности (чугуна, бронзы), вязких металлов и сплавов (мягкой латуни, алюминия, меди), а также для обработки таких неметаллических материалов, как кожа, стекло, мрамор и т.д.

Карбид бора (B_4C) обладает высокой твердостью (но в 2 раза меньшей твердости алмаза). Используется он для доводки твердосплавного инструмента, так как обеспечивает минимальный радиус округления режущего лезвия — до 6...10 мкм (электрокорунд образует радиус до 15 мкм), а также при обработке весьма твердых материалов, например рубина, корунда, кварца и т.д.

Некоторые сведения о свойствах сверхтвердых абразивных материалов (алмаза и КНБ) приведены ранее (см. гл. 2). В настоящее время выпускаются *жмонокристаллические синтетические алмазы* следующих марок:

АС2 — обычной прочности, предназначенный для изготовления инструментов на органической связке, а также паст и порошков;

АС4 — повышенной прочности, применяемый для изготовления инструментов на керамической и металлической связках;

АС6 — высокой прочности, предназначенный для изготовления инструментов на металлической связке, которые работают при больших удельных нагрузках, характерных для черновых операций;

АС15 — кристаллический с прочностью, близкой к прочности природных алмазов.

Наряду с монокристаллическими алмазными зернами выпускаются *поликристаллические*, которые обозначаются АР. Выпускаются также алмазные микропорошки марок АСМ, АМ, АСН, АН. Буква С в данном случае означает «синтетический». Первые марки предназначены для притирочных и доводочных работ при обработке твердых сплавов и сталей. Микропорошки марок АСН, АН обладают повышенной абразивной способностью и применяются при обработке наиболее твердых материалов (алмаз, рубин и т.д.).

Отрицательным свойством алмаза является то, что при обработке материалов на железной основе при температуре около 850...900 °С наблюдается активная диффузия углерода из алмаза в железо, что резко повышает изнашивание алмазного инструмента. Исключение составляет *кубический нитрид бора* (КНБ, или эльбор), зерна которого при одинаковой примерно твердости с алмазом характеризуются значительно большей теплостойкостью (до 1500...1900 °С) и отсутствием химического сродства к железу. Эльбор выпускается двух марок: ЛО — обычной механической прочности, с обычным содержанием основной фракции; ЛП — повышенной механической прочности, с повышенным содержанием основной фракции.

Под *зернистостью* абразивных материалов понимают размеры их зерен. По своим размерам (крупности) они делятся по номерам: 200, 160, 125, 100, 80, 63, 50, 40, 32, 25, 20, 16, 12, 10, 8, 6, 5, 4, 3, М63, М50, М40, М28, М20, М14, М10, М7, М5.

По размерам зерна абразивные материалы делятся на следующие группы: шлифзерно — 200, 160, 125, 100, 80, 63, 50, 40, 32, 25, 20, 16; шлифпорошки — 12, 10, 8, 6, 5, 4, 3; микропорошки — М63, М50, М40, М28, М20, М14; тонкие микропорошки — М10, М7, М5.

Зернистость шлифзерна и шлифпорошка определяется размером стороны ячейки контрольного сита (в сотых долях миллиметра). Шлифзерно 200 при просеивании остается на сите с сеткой, у которой номинальный размер стороны ячейки на просвет равен 2000 мкм; 160 — на сите с ячейкой 1600 мкм; 5 — на сите с ячейкой 50 мкм и т.д.

Зернистость микропорошка определяется размером зерен основной фракции в микрометрах, например М40 — 40...28 мкм, М28 — 28...20, М5 — 5...3 мкм.

Согласно ГОСТ 3647-80 различают следующие фракции зерна: В (60...55 % зерен основной фракции), П (55...45 %), Н (45...40 %), Д (43...39 %).

Для эльбора различают три группы зернистости: шлифзерно (Л125...Л16), шлифпорошки (Л12...Л4), микропорошки (ЛМ40...ЛМ1). Необходимо отметить, что эльборовые зерна имеют шероховатость поверхности, подобную шероховатости естественных алмазных зерен.

Связка служит для скрепления отдельных абразивных зерен в единое тело (ГОСТ 21445-84). От нее в большой степени зависит прочность удержания зерен в шлифовальном круге. Различают два вида связок: органические и неорганические. К неорганическим связкам относятся керамическая, магниезиальная и силикатная.

Керамическая связка (К) получила наиболее широкое применение. Она состоит из каолина, огнеупорной глины, талька, жидкого стекла, полевого шпата, кварца, обладает большой теплостойкостью, водоупорностью, высокой химической стойкостью, обеспечивает высокую производительность и хорошо сохраняет профиль круга. Однако она чувствительна к ударам и изгибающим нагрузкам. Допустимая скорость шлифования кругом на керамической связке $v_k = 30...50$ м/с. В настоящее время выпускается несколько разновидностей керамической связки.

Магниезиальная связка (М) представляет собой смесь каустического магнезита и раствора хлористого магния, твердеющую на воздухе, — магниезиальный цемент. Шлифовальные круги на этой связке гигроскопичны и должны храниться в сухом проветриваемом помещении. Круги быстро изнашиваются и теряют профиль; скорость шлифования ими — не более 20 м/с, но работают они с небольшим нагревом обрабатываемой поверхности.

Силикатная связка (С) имеет основное связующее вещество — растворимое стекло (силикат натрия). Тепловыделение при шлифовании такими кругами минимальное, поэтому они применяются на таких операциях, где нагрев обрабатываемых деталей недопустим. Однако прочность силикатной связки намного ниже, чем керамической, и круги размягчаются от охлаждающей жидкости.

К органическим связкам относятся бакелитовая (Б), глифталевая (Г), поропластовая (П) и вулканитовая (В). Все орга-

нические связки намного прочнее неорганических. Так, при использовании *бакелитовой связки*, изготавливаемой из искусственной фенолформальдегидной смолы и обладающей высокими прочностью, твердостью и упругостью, можно получить круги толщиной до 1 мм. Интенсивность тепловыделения при работе такими кругами низкая, однако данная связка характеризуется пониженным сцеплением с зернами и способна разрушаться под действием щелочных растворов, входящих в состав СОЖ. Для уменьшения вредного воздействия щелочных растворов круги на бакелитовой связке обмазывают по всей поверхности суриком или серой либо окрашивают водонепроницаемой краской. Допустимая скорость шлифования кругов на этой связке равна 30...50 м/с.

Глифталевая связка представляет собой синтетическую смолу из глицерина и фталевого ангидрида. Круги на глифталевой связке применяются для чистовых и отделочных операций, так как ей присуща повышенная упругость.

Поропластовая связка на основе вспененного поливинилформальды характеризуется повышенной пористостью и используется при обработке вязких материалов.

Вулканитовая связка состоит из каучука и серы и обладает высокой прочностью и эластичностью. Она позволяет изготавливать тонкие (до 0,5 мм) круги относительно большого диаметра (до 150 мм). Круги на этой связке могут выдерживать большие давления и широко применяются на чистовых, полировальных и отрезных операциях, особенно в подшипниковой промышленности.

Абразивные инструменты на вулканитовой связке делятся на *ж е с т к и е* (связка — эбонит) и *г и б к и е* (связка — резина). Жесткие круги изготавливаются различного ассортимента: от тонких отрезных дисков до прессованных жестких кругов для скоростного шлифования, которые отличаются постоянством эксплуатационных свойств, меньше нагревают деталь, обеспечивают высокое качество обработки.

Гибкие круги различаются степенями эластичности: *эластичный* (1ГК), *среднеэластичный* (2ГК), *малоэластичный* (3ГК) и *жесткий* (4ГК). Допустимая скорость резания для гибких кругов — до 18 м/с. Основным их достоинством является то, что во время работы их рабочий профиль принимает форму обрабатываемой поверхности вследствие того, что для них используется вулканитовая связка с низким модулем упругости и относительно большим удлинением при разрыве. Такие круги хорошо зарекомендовали себя при декоративной обработке.

Связки, предназначенные для изготовления алмазных шлифовальных кругов, подразделяются на три группы: *органические* (В1, В2, В3, В4, Т02, Т04, ВР, В156, КВ и др.), *металлические* (М1, М4, М5, МК, МВ1, М013, МС1, МС6, МС15, М04, М016) и *керамические* (КС, К2, К5, СК, СТ и др.).

Из перечисленных органических связок наиболее широкое распространение получили В1, Т02, В2 и В156. На этих связках изготавливаются алмазные круги с 50, 100 и реже со 150%-й и большей концентрацией алмазов в алмазоносном слое. За 100%-ю концентрацию условно принимается содержание алмазного порошка в 1 мм³ алмазоносного слоя, равное 0,88 мг. Алмазоносный слой кругов на органических связках включает кроме алмазов наполнитель, связующее вещество и воздушные поры. Содержание этих составляющих зависит от концентрации алмазных зерен в круте, а наполнителями служат различные органические и минеральные вещества (в связке В1 — карбид бора, в связке В2 — железный порошок, в связке В3 — электрокорунд белый, в связке В4 — карбид кремния зеленый, в связке Т02 — смесь карбида бора с медным порошком и т.д.). Для уменьшения влияния наполнителя на шероховатость шлифованной поверхности зернистость последнего выбирают на два номера меньше зернистости алмазного порошка.

Из металлических связок наиболее широко распространены МИ, М1, М5, МК. Круги на этих связках обладают более высокой износостойкостью по сравнению с кругами на бакелитовой связке, менее чувствительны к изменениям сил резания, хорошо сохраняют свою геометрическую форму и рекомендуются в основном для предварительного шлифования и заточки твердосплавного инструмента. Однако металлические связки склонны к засаливанию, и при их применении рекомендуется работать с охлаждением. Основой для большинства таких связок являются медь и ее сплавы с оловом, алюминием, никелем и другими материалами. Наполнителями в связках МИ и МК служат соответственно карбид кремния зеленый и электрокорунд.

Под *твердостью кругов* понимается способность связки удерживать абразивные зерна от вырывания их с поверхности круга под действием внешних сил, т.е. степень сопротивления связки вырыванию зерен круга из материала связки. Согласно ГОСТ 18118-79 круги на керамической и бакелитовой связках по твердости делятся на семь классов: М — мягкие (обозначаются М1, М2, М3); СМ — среднемягкие (СМ1, СМ2); С — средние (С1, С2); СТ — среднетвердые (СТ1, СТ2, СТ3); Т — твердые (Т1, Т2); ВТ — весьма твердые; ЧТ —

чрезвычайно твердые. Обозначение твердости идет по степени ее возрастания, поэтому круг М2 тверже М1.

Круги на вулканитовой связке различаются по твердости: *среднемягкая* (СМ), *средняя* (С), *среднетвердая* (СТ) и *твердая* (Т).

Выбор твердости шлифовальных кругов имеет большое значение. При правильном выборе твердости зерна по мере затупления самопроизвольно выкрашиваются, обнажая новые острые зерна, т.е. идет процесс самозатачивания. При слишком твердом круге этот процесс не происходит, поэтому наступает засаливание рабочей поверхности круга, способствующее резкому возрастанию контактной температуры, а следовательно, появлению прижогов и даже шлифовочных трещин.

Шлифование слишком мягким кругом приводит к тому, что зерна выкрашиваются, не успев затупиться, в результате чего наблюдается повышенный износ круга и снижение производительности обработки. На практике обычно применяют твердые круги при шлифовании мягких материалов и, наоборот, мягкие круги при шлифовании твердых материалов. Однако в каждом конкретном случае следует учитывать все особенности процесса шлифования обрабатываемой детали.

ГОСТ 2424-83 предусматривает изготовление шлифовальных кругов трех классов точности: АА, А и В. В зависимости от класса точности кругов должны применяться шлифовальные материалы со следующими индексами: В и П — для класса точности АА; В, П и Н — для класса точности А; В, П, Н и Д — для класса точности В.

Под *структурой* шлифовального круга понимается его внутреннее строение, т.е. процентное соотношение и относительное расположение зерен, связки и пор в единице объема круга:

$$V_z + V_c + V_n = 100 \%,$$

где V_z , V_c , V_n — содержание соответственно абразивных зерен, связки, пор.

Основной системы структур является содержание абразивных зерен в единице объема инструмента:

Номер структуры.....	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Содержание зерен, % ...	60	58	56	54	52	50	48	46	44	42	40	38

С повышением номера структуры на единицу содержание абразивных зерен уменьшается на 2%. Структуры № 1-4 называются

закрытыми или плотными (рис. 10.1, а), № 5–8 — средними (рис. 10.1, б), № 9–12 — открытыми (рис. 10.1, в).

Для различных работ рекомендуются следующие структуры шлифовальных кругов: шлифование твердых и хрупких металлов, с малой шероховатостью поверхности, фасонное шлифование — круги с мелкими порами, структуры № 4, 5; наружное круглое шлифование, заточка инструмента — круги с порами среднего размера, структура № 6; шлифование мягких и вязких металлов, плоское шлифование — круги с крупными порами, структуры № 7, 8; скоростное шлифование — круги с крупными порами, открытые структуры № 9–12.

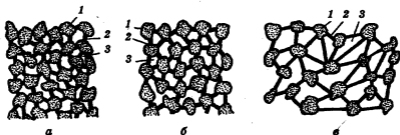


Рис. 10.1. Структура шлифовального круга:
1 — зерна абразива; 2 — связка; 3 — поры




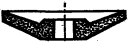
Дисбаланс шлифовального круга — следствие неодинаковой плотности материала круга, неправильной формы наружной поверхности, эксцентricности расположения посадочного отверстия по отношению к наружной поверхности круга или эксцентricности установки круга на шпинделе станка и т.д. Дисбаланс является источником вибраций станка, причиной разрыва кругов, ускоренного изнашивания подшипников шпинделя и образования волнистости на обработанной поверхности.

ГОСТ 3060–86 устанавливает четыре класса дисбаланса (1, 2, 3 и 4) в зависимости от ширины круга, его зернистости и связки: чем меньше круг, тем меньший дисбаланс допускается.

В настоящее время выпускаются шлифовальные круги диаметром 3...1600 мм, толщиной 6...250 мм с разнообразными профилями. В табл. 10.1 приведены некоторые наиболее характерные типовые формы абразивных кругов. Кроме стандартных форм кругов применяются и нестандартные, использование которых объясняется специфическими потребностями отдельных видов производства.

Таблица 10.1

Некоторые профили шлифовальных кругов

Форма	Обозначение	Профиль
Плоский прямого профиля	1	
Чашечный цилиндрический	6	
Чашечный конический	11	
Тарельчатый	14	

Маркировка шлифовальных кругов необходима для удобства их эксплуатации. Характеристики шлифовального круга наносятся на его торцовую поверхность. Например, абразивный круг прямого профиля (тип 1), имеющий наружный диаметр $D = 500$ мм, ширину $B_k = 50$ мм, диаметр посадочного отверстия $d = 305$ мм, материал абразива — белый электрокорунд марки 24А, зернистость 10-П, твердость С2, структуру № 7, керамическую связку марки К5, рабочую скорость 35 м/с, 1-й класс неуровненности, класс точности А, маркируется следующим образом:

1500×50×305 24А 10-П С2 7 К5 35 м/с 1 кл.А.

Маркировка алмазных шлифовальных кругов производится следующим образом: указываются форма, основные размеры круга и алмазосодержащего слоя, зернистость, связка, концентрация и количество алмазов в круге (в каратах), а также наименование предприятия-изготовителя или его товарный знак, номер круга и год его изготовления. Например, в круге

12АЧ-45 150×10×3×32 АС2 10 В1 2 29 № 8-99

маркировка читается так: 12АЧ-45 — алмазный круг чашечный, конический; 150 — наружный диаметр круга, мм; 10 — ширина ал-

мазозносного кольца, мм; 3 — толщина этого кольца, мм; 32 — диаметр посадочного отверстия, мм; АС2 — алмаз синтетический обычной прочности; 10 — зернистость алмазного порошка; В1 — связка бакелитовая первая (с наполнителем из карбида бора); 2 — относительная концентрация алмазов в алмазозносном слое, % (цифрами 1, 2, ..., 6 обозначается соответственно 25, 50, 75, 100, 125 и 150%-я концентрация); 29 — содержание алмазного порошка, карат; 8 — заводской номер круга; 99 — год изготовления круга.

Инструмент, изготовленный из эльбора, маркируется подобно алмазному. Например, маркировка

12АЧ-45 150×10×3×32 Л 10 В1 6 58 № 43-99

читается так: эльборовый чашечный круг диаметром 150 мм с рабочим слоем шириной 10 мм и толщиной 3 мм, диаметр посадочного отверстия 32 мм, эльборовое зерно (Л), зернистость 10, связка В1, номер структуры 6, концентрация 150 %, количество эльбора в круге 58 каратов; 43 — заводской номер круга; 99 — год изготовления круга. Концентрация 100 % в эльборовых кругах не указывается.

10.2. Особенности процесса шлифования

Шлифование — процесс резания металлов, осуществляемый зернами абразивного, алмазного или эльборового материалов. Шлифованием можно обрабатывать практически любые материалы, так как твердость зерен абразива (2200...3100 НВ) и алмаза (7000 НВ) очень велика. Для сравнения отметим, что твердость твердого сплава 1300 НВ, цементита 2000 НВ, закаленной стали 600...700 НВ. Зерна абразива скрепляются связкой в инструменты различной формы или наносятся на ткань (абразивные шкурки). Шлифование применяется чаще всего как отделочная операция и позволяет получать детали 7...9-го и даже 6-го качества с шероховатостью $Ra = 0,63...0,16$ мкм и менее. В некоторых случаях шлифование применяется при обдирке отливок и поковок, при зачистке сварных швов, т.е. как подготовительная или черновая операция. В настоящее время применяется глубинное шлифование для съема больших припусков.

Процесс шлифования обладает некоторыми характерными особенностями.

1. Многопроходность способствует эффективному исправлению погрешностей формы и размеров деталей, полученных после предшествующей обработки.

2. Резание осуществляется большим количеством беспорядочно расположенных абразивных зерен, обладающих высокой микротвердостью (22...31 ГПа). Эти зерна, образующие прерывистый режущий контур, прорезают мельчайшие углубления, а объем металла, срезаемый в единицу времени, в этом случае значительно меньше, чем при резании металлическим инструментом. Одним абразивным зерном в единицу времени срезается примерно в 400 тыс. раз меньший объем металла, чем одним зубом фрезы.

3. Процесс срезания стружки отдельным абразивным зерном осуществляется на высоких скоростях резания (30...70 м/с) и за очень короткий промежуток времени (в течение тысячных и сотых долей секунды).

4. Абразивные зерна расположены в теле круга хаотически. Они являются многогранниками неправильной формы и имеют округленные радиусом ρ вершины (рис. 10.2). Округление это невелико (обычно $\rho = 8...20$ мкм), но его всегда надо учитывать, так как при микрорезании толщины слоев, снимаемых отдельными зернами, соизмеримы с ρ . С учетом этой особенности формы зерна установлены основные закономерности процесса микрорезания при работе любым абразивным инструментом [2]. Как видно из рисунка, в процессе резания зерна имеют отрицательные передние углы ($-\gamma$), резко повышающие их механическую прочность и сопротивление действующим на них силам. Угол резания δ обычно больше 90° . У каждого шлифующего зерна различают переднюю поверхность

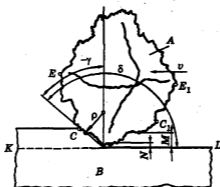


Рис. 10.2. Схема шлифующего зерна при микрорезании (A — основной царапающий элемент (абразивное зерно); M — микровыступ; N — суб-микровыступ; KL — линия среза)

ЕСВ, по которой сходит стружка, и заднюю поверхность BC_1E_1 , обращенную к обработанной поверхности.

Поверхность абразивных и алмазных зерен всегда имеет шероховатость, вызываемую внутренним строением (несовершенством) в связи с условиями их изготовления. Наиболее значительна шероховатость синтетических алмазов. В связи с этим на зернах различают микровыступы и субмикровыступы. Они играют роль самостоятельных царапающих элементов, снимающих стружки, в 10 и 100 раз меньшие по сравнению с основным царапающим элементом. Следовательно, при алмазно-абразивной обработке имеет также место микро- и субмикрорезание.

Из-за наличия округления режущих элементов в зоне тонких стружек создаются более тупые углы резания δ .

5. Большие скорости резания и неблагоприятная геометрия режущих зерен способствуют развитию в зоне резания высоких температур (1000...1500 °C).

6. Управлять процессом шлифования можно только за счет изменения режимов резания, так как изменение геометрии абразивного зерна, выполняющего роль резца или зуба фрезы, практически трудноосуществимо. Алмазные круги благодаря специальной технологии изготовления могут иметь преимущественную (требуемую) ориентировку алмазных зерен в теле круга, что обеспечивает более благоприятные условия резания.

7. Абразивный инструмент может в процессе работы самозатачиваться. Это происходит, когда режущие грани зерен затупляются, что вызывает увеличение сил резания, а следовательно, и сил, действующих на зерно. В результате затупленные зерна выпадают, вырываются из связки или раскалываются, и в работу вступают новые острые зерна.

8. Шлифованная поверхность образуется вследствие одновременного действия как геометрических факторов, характерных для процесса резания, так и пластических деформаций, сопровождающих этот процесс.

При изучении механизма образования шлифованной поверхности основное внимание следует уделять вопросу образования шероховатости и волнистости. С геометрической точки зрения шероховатость образуется в результате копирования на обрабатываемой поверхности траектории движения режущих абразивных зерен. Пластическое деформирование, происходящее в процессе резания, сильно искажает микрорельеф, получающийся в результате действия геометрических факторов.

Что касается геометрической схемы образования шлифованной поверхности, необходимо иметь в виду следующее:

1) для большего соответствия действительному процессу стружкообразования следует рассматривать врезание зерен в шероховатую поверхность, а сами зерна считать хаотично расположенными во всем объеме круга (рис. 10.3). Шлифование должно рассматриваться как явление пространственное, а не плоскостное. В зоне резания обрабатываемая элементарная поверхность (например, на участке *l*) за время ее контакта со шлифовальным кругом соприкасается не с одним рядом зерен, а с несколькими;

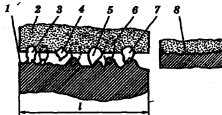


Рис. 10.3. Схема образования шлифованной поверхности:

1 — шероховатая поверхность до шлифования; 2 — шлифовальный круг; 3, 4, 5, 7 — первый ряд абразивных зерен (сплошные линии), находящихся на одной образующей; 6 — второй (соседний) ряд зерен (штриховые линии); 8 — профиль шлифованной поверхности после выхода ее из зоны контакта с кругом

2) чем меньше неровности абразивного режущего контура, тем ближе он подходит к сплошному режущему лезвию и тем менее шероховатой получается обработанная поверхность. Одинаковый режущий контур можно создать уменьшением номера зернистости или увеличением времени абразивного воздействия, например за счет понижения скорости вращения детали или уменьшения продольной подачи за один оборот изделия;

3) упорядоченный режущий рельеф достигается алмазной правкой. В процессе шлифования по мере разрушения и выпадания отдельных зерен упорядоченный режущий рельеф нарушается. Режущие лезвия располагаются хаотично, и процесс стружкообразования протекает по схеме, приведенной на рис. 10.3. При шлифовании в режиме самозатачивания круга процесс стружкообразования идет в основном по той же схеме;

4) абразивные зерна в процессе врезания можно разделить на режущие (например, зерна 3, 7), скоблящие, если они врезаются на

столь малую глубину, что происходит лишь пластическое выдавливание металла без снятия стружки (на схеме они не указаны), давящие 5 и нережущие 4. В реальном процессе шлифования примерно 85...90 % всех зерен не режет, а так или иначе пластически деформирует тончайший поверхностный слой, т.е. наклепывает его. За счет наклепа микротвердость могла бы значительно возрасти, но этому противодействует явление отдыха, происходящего из-за высокой температуры резания. Тем не менее, при тонком шлифовании, особенно при выхаживании или шлифовании с очень малой либо нулевой подачей, эффект наклепа резко возрастает, а шероховатость уменьшается; скользящих и давящих зерен становится больше, и они упрочняют поверхностный слой;

5) на шероховатость влияет не только зернистость, но и связка абразивного инструмента, оказывающая полирующий эффект, который особенно проявляется при меньших скоростях вращения круга. Экспериментально доказано [6], что по убывающей степени влияния на уменьшение шероховатости шлифованной поверхности основные технологические факторы можно распределить в следующем порядке: выхаживание — алмазная правка круга — скоростное шлифование — уменьшение размеров зерен круга — варьирование режимами резания — влияние материала связки — влияние химического состава и чистоты СОЖ.

Установлено, что шлифованная поверхность не может представлять собой массу параллельных рисок как точное воспроизведение или след движения абразивных зерен. В результате больших давлений при резании и возникающих при этом пластических деформаций поверхностные слои металла вытягиваются и образуют надрывы с поперечными скоплениями металла. Как результат большого разогрева тончайшего слоя наблюдается «размазывание» размягченного металла по обработанной поверхности. Эти явления сильно изменяют рельеф поверхности по сравнению с рельефом, образованным чисто геометрическими факторами.

Виды шлифования. Элементы режима резания при шлифовании

10.3.

Наиболее часто встречающимися в современном машиностроении способами шлифования являются:

1) наружное круглое (с продольной, или осевой, подачей, с поперечной подачей, бесцентровое);

2) внутреннее (при вращающейся детали с продольной и поперечной подачами; бесцентровое; при неподвижной детали — планетарное);

3) плоское (периферией, торцом круга);

4) специальное (резьбовое, фасонное и т.д.).

Процесс шлифования обычно осуществляется посредством трех движений: вращения шлифовального круга, вращения или перемещения (кругового либо возвратно-поступательного) детали и движения подачи, осуществляемого кругом или обрабатываемой деталью. Некоторые из указанных движений могут отсутствовать, например возвратно-поступательное движение детали или круга при врезном шлифовании, однако вращение шлифовального круга является неотъемлемым условием процесса шлифования.

Скорость круга v_k (м/с) является скоростью резания и определяется по формуле

$$v_k = \frac{\pi D_k n_k}{60 \cdot 1000},$$

где D_k — диаметр круга, мм; n_k — частота вращения круга, об/мин.

Скорость обрабатываемой детали v_d (м/мин) при круглом наружном и внутреннем шлифовании

$$v_d = \frac{\pi D_d n_d}{1000},$$

где D_d — диаметр шлифуемых деталей или отверстия, мм; n_d — частота вращения детали, об/мин.

Подача в направлении снятия припуска — **поперечная подача** $S_n = t$ при круглом наружном (рис. 10.4, а) и внутреннем шлифовании с продольной подачей устанавливается за двойной или один ход обрабатываемой детали либо круга. При черновом наружном шлифовании $S_{2x} = t = 0,01 \dots 0,07$ мм за двойной ход, при чистовом $S_{2x} = t = 0,005 \dots 0,02$ мм за двойной ход.

Продольную подачу назначают в долях ширины круга или миллиметра за один оборот обрабатываемой детали, а также в метрах в минуту. При черновом наружном шлифовании $S_{пр} = (0,3 \dots 0,85)B$, при чистовом $S_{пр} = (0,2 \dots 0,3)B$, где B_k — ширина круга, мм.

Шлифование методом врезания (рис. 10.4, б) чаще всего применяют при обработке кругом 1 фасонных, а также коротких жестких деталей 2. Поперечная подача при этом принимается равной $0,002 \dots 0,005$ мм/об. Иногда задается минутная подача $0,8 \dots 3$ мм/мин.

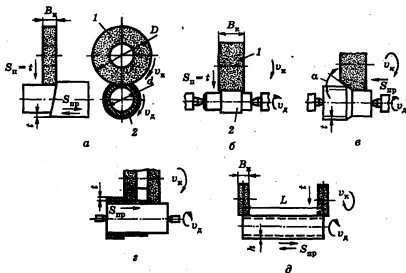


Рис. 10.4. Круглое наружное шлифование в центрах: 1 — шлифовальный круг; 2 — деталь

Глубинное шлифование (рис. 10.4, е) применяют при обработке жестких коротких деталей со снятием припуска (до 0,4 мм) за один проход. Продольная подача выбирается в пределах 1...6 мм за оборот детали. Чем больше диаметр обрабатываемой детали, тем большее значение $S_{пр}$ принимается. Основную работу резания выполняет коническая часть круга, а цилиндрическая только зачищает обрабатываемую поверхность. Разновидностью глубинного шлифования является обработка одновременно двумя кругами (рис. 10.4, з).

Схема для расчета основного времени при круглом наружном шлифовании представлена на рис. 10.4, д, а при внутреннем — на рис. 10.5, в.

Внутреннее круглое шлифование может осуществляться обычным и планетарным способами. В первом случае (рис. 10.5, а) деталь закрепляется в патроне и получает вращательное движение; круг вращается и имеет возвратно-поступательное движение ($S_{пр}$) и поперечную подачу (S_n) на каждый двойной ход. При планетарном способе внутреннего шлифования деталь неподвижна, а все движения осуществляются кругом (рис. 10.5, б). Этот метод применяется при обработке крупных и тяжелых деталей. Шлифо-

вальный шпиндель станка имеет четыре движения: 1) вокруг своей оси со скоростью круга до 35 м/с; 2) планетарное вокруг оси обрабатываемого отверстия со скоростью 40...60 м/мин; 3) возвратно-поступательное вдоль оси изделия, измеряемое в долях ширины круга; 4) поперечная подача, осуществляемая после каждого двойного хода (0,008...0,02 мм за двойной ход).

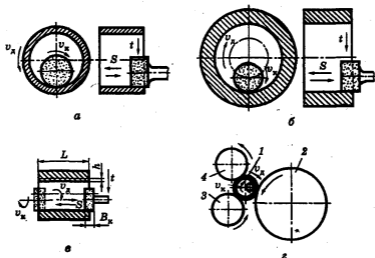


Рис. 10.5. Внутреннее шлифование

Внутреннее круглое шлифование протекает в более тяжелых условиях, чем наружное. Связано это с тем, что нагрузка на каждое зерно круга для внутреннего шлифования больше, чем для наружного, так как велика поверхность контакта круг — деталь. Диаметр шлифовального круга D_k меньше диаметра обрабатываемого отверстия D и составляет $(0,75...0,25)D$. Кроме того, размеры посадочного отверстия кругов для внутреннего шлифования малы, поэтому шпиндель недостаточно жесткий. Проникновение СОЖ в зону резания плохое, что приводит к снижению теплоотвода.

Учитывая ухудшенные условия внутреннего шлифования, режимы резания (глубина и подача) принимают примерно в 2 раза меньшими, чем при наружном круглом шлифовании.

Плоское шлифование осуществляется двумя методами: периферией круга (рис. 10.6, а) и торцом круга (рис. 10.6, б). Для этого могут использоваться круглые или прямоугольные столы.

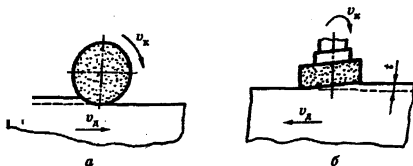


Рис. 10.6. Плоское шлифование

При шлифовании торцом круга поверхность контакта значительно больше, чем при шлифовании его периферией, и сопровождается большим тепловыделением в зоне резания. Следовательно, шлифование торцом круга применимо для обработки массивных жестких деталей. Для лучшего использования режущей способности круга ось шпинделя круга устанавливают под некоторым углом ($\approx 30^\circ$). Получение шлифованной поверхности сопровождается чаще всего сеткой (рис. 10.7), представляющей собой след от резания входной и выходной сторонами круга. Наличие сетки свидетельствует о минимальных отклонениях от плоскостности прошлифованной поверхности.

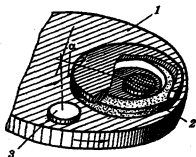


Рис. 10.7. Схема образования сетки на шлифуемой поверхности при работе торцом круга:

1 — магнитный стол; 2 — шлифовальный круг; 3 — шлифуемая деталь

При плоском шлифовании торцом круга абразивные зерна более продолжительное время находятся в работе и быстрее тупятся, поэтому для плоского шлифования обычно выбираются более мягкие круги, чем для круглого.

Глубина резания t принимается равной $0,05 \dots 0,10$ мм. Большие значения t берутся для более жестких деталей. Остальные элементы режима резания для плоского шлифования выбираются примерно такими же, как и для круглого наружного шлифования.

Бесцентровое шлифование может применяться для обработки как внутренних, так и наружных поверхностей, осуществляться напроход и до упора. Рассмотрим некоторые основные принципиальные особенности процесса бесцентрового шлифования на примере обработки наружной поверхности гладкого цилиндрического валика (рис. 10.8, а).

Деталь 2 помещается на опорном ноже 4 между двумя вращающимися с различными скоростями кругами 1 и 3. Рабочий круг 1 осуществляет процесс резания, а ведущий круг 3 обеспечивает вращательное и поступательное движения детали за счет разворота его оси относительно оси рабочего круга на угол $\alpha = 1 \dots 5^\circ$. Ось детали устанавливается выше осей кругов на $h = (0,1 \dots 0,3)d$, где d — диаметр детали. Большое значение h берется при обработке детали меньшего диаметра. Вектор скорости ведущего круга раскладывается на вектор скорости вращения детали v_d (рис. 10.8, б) и вектор скорости ее продольного перемещения v_s . Рабочий круг вращается со скоростью $30 \dots 35$ м/с, ведущий — $15 \dots 30$ м/мин. В результате разных скоростей вращения кругов сила трения между ведущим кругом и деталью значительно больше окружной силы резания, что обеспечивает вращательное движение детали. Для увеличения силы трения ведущий круг изготавливают на вулканитовой связке, зернистостью $10 \dots 12$ и твердостью СТ2 — Т1.

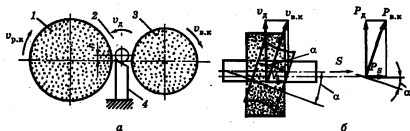


Рис. 10.8. Бесцентровое шлифование

Значения v_d и v_s можно подсчитать по следующим формулам:

$$v_d = v_{в.к} \cos \alpha = \frac{\pi D_{в.к} n_{в.к} \cos \alpha}{1000};$$

$$v_S = v_{в.к} \sin \alpha = \frac{\pi D_{в.к} n_{в.к} K \sin \alpha}{1000},$$

где $K = 0,95 \dots 0,99$ — коэффициент осевого проскальзывания детали.

Если $\alpha = 5^\circ$, а для данного случая $\cos 5^\circ \approx 1$, то (без учета кругового проскальзывания в месте контакта) $v_d \approx v_{в.к}$.

Зная v_S и $n_d = 1000v_d/(\pi d)$, можно определить продольную подачу на оборот детали:

$$S_{np} = \frac{\pi d v_S}{1000 v_d}.$$

Угол α в определенной степени влияет на производительность обработки и качество шлифованной поверхности. Чем он больше, тем выше производительность, но хуже качество обработанной поверхности. Обычно для черного шлифования принимают $\alpha = 3 \dots 5^\circ$, для чистового — $\alpha = 1 \dots 2^\circ$.

Что касается внутреннего бесцентрового шлифования, то все основные движения сохраняются такими же, как и при внутреннем обычном шлифовании (см. рис. 10.5, а). Принципиальное отличие бесцентрово-шлифовальных станков для внутреннего шлифования заключается в способе зажима изделия, который осуществляется так, как указано на рис. 10.5, з. Деталь 1 устанавливается между роликами 2, 3 и 4. Ролик 2 сообщает вращение детали и называется ведущим. Ролик 4 служит для прижима изделия во время шлифования и называется прижимным. Ведущий ролик вращается от специального привода и за счет трения вращает деталь, которая, в свою очередь, вращает опорный и прижимной ролики. Последний имеет еще дополнительное периодическое движение в вертикальной плоскости для освобождения детали с целью осуществления ее загрузки и разгрузки. В осевом направлении деталь фиксируется опорной планкой или опорной втулкой, которая вращается вместе с деталью за счет прижима к ней детали. Сила прижима создается поворотом оси ведущего ролика в вертикальной плоскости на угол 30° . При внутреннем шлифовании деталь и шлифовальный круг вращаются в одном направлении, ролик 3 фиксирует положение детали и называется опорным.

Способ бесцентрового зажима может применяться только для деталей, имеющих цилиндрическую наружную поверхность, строго концентричную обрабатываемому отверстию. Использование данного способа повышает точность обработки благодаря отсутствию дополнительного зажимного приспособления, применяемого в стан-

как патронного типа, и процесс довольно легко автоматизировать. Однако следует иметь в виду, что геометрические погрешности наружной поверхности обрабатываемой детали (овальность, огранка и т. д.) вызывают неточности вращения ее в процессе обработки, что влечет снижение точности шлифования. Кроме того, бесцентровое внутреннее шлифование будет экономичным только в случае обработки больших партий деталей, так как станки для бесцентрового внутреннего шлифования работают в основном с полным автоматическим циклом.

Поперечное сечение срезаемого слоя

10.4. при шлифовании

За один оборот детали снимается слой металла площадью сечения $F = S_{\pi} S_{\text{пр}}$. Вместе с тем работу круга характеризует среднее мгновенное сечение слоя, снимаемого в данный момент времени.

Объем слоя металла, снимаемого за один оборот детали,

$$V = \pi d S_{\pi} S_{\text{пр}}$$

Длина абразивной поверхности, работающей в течение 1 мин, или путь, пройденный кругом относительно детали за одну минуту, определим как $L = \pi D_{\kappa} n_{\kappa}$ (вращением детали пренебрегаем, так как $v_{\text{д}}/v_{\kappa} \approx 0,01$).

Путь, пройденный периферийными точками круга за один оборот детали, $l = L/n_{\text{д}} = \pi D_{\kappa} n_{\kappa}/n_{\text{д}}$.

Площадь f среднего мгновенного сечения слоя, снятого всеми абразивными зернами, будет равна всему снятому объему металла, деленному на путь l :

$$f = \frac{V}{l} = \frac{\pi d S_{\pi} S_{\text{пр}}}{\pi D_{\kappa} n_{\kappa}/n_{\text{д}}} = \frac{\pi d n_{\text{д}}}{\pi D_{\kappa} n_{\kappa}} S_{\pi} S_{\text{пр}} = \frac{v_{\text{д}}}{60 v_{\kappa}} S_{\pi} S_{\text{пр}}$$

где $v_{\text{д}}$ — скорость вращения детали, м/мин; v_{κ} — скорость вращения круга, м/с.

Проанализировав полученную формулу, можно утверждать, что с увеличением $v_{\text{д}}$ возрастает f , а следовательно, и нагрузка на каждое зерно, круг изнашивается быстрее, шероховатость поверхности увеличивается. При увеличении v_{κ} картина обратная. Отсюда следует, что для получения менее шероховатой поверхности следует

работать с возможно большей скоростью v_k , меньшей v_d и малыми S_n и S_{np} . Уменьшению шероховатости поверхности способствует также обработка ее мелкозернистыми кругами. С уменьшением скорости вращения детали увеличивается время воздействия теплового источника на каждую точку обрабатываемой поверхности, что может привести к образованию прижогов. Поэтому при чистовом и скоростном шлифовании увеличивают v_d , а для того, чтобы при этом не возрастала площадь f , во столько же раз повышают v_k . Это способствует росту производительности обработки и снижению вероятности получения шлифованной поверхности с прижогом.

Если известна площадь f , можно вычислить среднюю мгновенную толщину слоя a_{cp} (среднюю глубину резания), снимаемого всеми абразивными зёрнами, разделив f на продольную подачу:

$$a_{cp} = f / (S_n S_{np}) = v_d S_n / (60 v_k).$$

Закономерности процесса резания

10.5. единичным зерном

Снятие стружки в процессе шлифования происходит при одновременном врезании в шлифуемую деталь нескольких зерен, находящихся в данный момент в месте контакта абразивного инструмента с деталью.

В связи с тем что зерна в круге расположены на разной высоте, сначала в металл врезаются кромки выступающих зерен, затем — лежащие глубже. Врезаясь в металл, кромка зерна сначала сдавливает его, и, если сила сжатия превосходит силу сопротивления металла, происходит отделение стружки. При этом очень многие зерна, скользя по металлу, уплотняют его поверхность, в результате чего последующим зернам приходится совершать большую работу для снятия стружки. Каждое зерно при шлифовании срезает стружку переменной толщины: совсем малой при врезании и выходе из контакта и большей в середине процесса врезания, т.е. оно испытывает переменные напряжения, постепенно возрастающие, а затем падающие. Таким образом, процесс образования стружки сопровождается упругим и пластическим деформированием, в результате которого имеет место изменение формы и свойств снимаемого металла и поверхностного слоя. Вследствие этого получаемые в процессе шлифования стружки деформированы в различной степени. Много

стружек образовано при большом угле сдвига, и они слабо деформированы, многие вследствие высокой температуры не имеют классической формы, и почти все различной толщины и ширины — от десятых долей микрометра до десятых долей миллиметра.

В тех случаях, когда зерна имеют острые кромки, небольшие радиусы округлений и оптимальные углы, наблюдается микрорезание металла. При этом получаемая стружка часто имеет такой же вид, как сливная стружка при точении незакаленной стали с высокой скоростью резания. Такую стружку чаще всего можно наблюдать при шлифовании кругами из монокорунда и карбида кремния. Если зерна имеют тупые кромки, большие радиусы округления и невыгодно ориентированы относительно обрабатываемой поверхности, то происходит ее скобление, причем образование стружки сопровождается в этих случаях резким повышением температуры и формируемая стружка целиком или частично сгорает. Чем больше радиусы округлений режущих кромок зерен, тем труднее они врезаются в снимаемый слой металла, больше трение, значительнее деформации стружки (коэффициент деформации $K \geq 5$), выше температура резания. Чем меньше радиусы округления зерен, тем меньше минимальная толщина снимаемой стружки.

Вершины зерен круга всегда имеют различное радиальное расположение относительно некоторого идеального диска, что обеспечивает разную нагрузку на отдельные шлифующие зерна в процессе шлифования. Возможен случай, когда стружку снимают одновременно несколько режущих элементов данного шлифующего зерна.

Разновысотность зерен, наличие у круга неточностей геометрической формы (бочкообразности, конусности и др.), а также некоторого его биения не позволяют обеспечить равномерную нагрузку всех зерен круга. Наиболее нагруженными являются выступающие зерна (режущие и давящие), а остальные зерна определенное время не работают (см. рис. 10.3). Лишь естественный износ выступающих зерен или новая правка круга вводит эти зерна в работу. Для некоторых усредненных условий шлифования примерно 78 % абразивных зерен являются нережущими, 12 % — давящими и только 10 % — режущими [2]. В связи с беспорядочным расположением зерен, их разновысотностью и различными расстояниями между ними в процессе шлифования будут переменными подачи на зерно S_z , фактические глубины резания зернами t_z , толщины срезов отдельными зернами a_z .

Общее число стружек, снимаемых периферией круга за один проход при круглом наружном шлифовании [1],

$$k = \pi D_k B n_k i_p L / (S_{пр} n_d),$$

где D_k — диаметр круга, мм; B — ширина круга, мм; n_k, n_d — частоты вращения соответственно круга и детали, об/мин; L — длина шлифующей поверхности, мм; i_p — количество режущих зерен на 1 мм ширины круга; $S_{пр}$ — продольная подача детали, мм/об.

Для конкретного случая шлифования кругом диаметром $D_k = 500$ мм, $B_k = 50$ мм, при $n_k = 1400$ об/мин, $n_d = 140$ об/мин, $L = 500$ мм, $S_{пр} = 20$ мм/об и $i_p = 3$ получим $k = 58\,875\,000$, т.е. около 60 млн стружек. При этом время, за которое снимет стружку каждое из зерен круга, расположенных в один ряд по ширине на его периферии,

$$t_p = 60 / (\pi D_k B_k n_k i_p).$$

Таким образом, чем больше частота вращения и диаметр круга, а также число зерен в нем, т.е. чем меньше его зернистость, тем меньше время, за которое снимается стружка. Влияние скорости детали на это время чрезвычайно мало, поэтому в этой формуле оно не учтено.

Для круга диаметром 500 мм, зернистостью 25, при $i_p = 3$, работающего с частотой вращения 1400 об/мин, время резания равно 0,0000009 с.

Ранее (см. § 10.4) была определена средняя мгновенная толщина слоя, снимаемого всеми абразивными зёрнами. Однако эффективность процесса шлифования определяется не ею, а средней и максимальной толщинами срезов, снимаемых единичным зерном. Условия резания единичным зерном определяются в первую очередь дугой его контакта с деталью в процессе обработки.

Из рис. 10.9 видно, что длина дуги контакта круга с изделием примерно равна дуге АВ. Истинное значение длины дуги контакта зерна с обрабатываемой деталью больше, чем длина дуги АВ, на величину дуги ВВ₁, равной дополнительному повороту детали за время поворота круга на угол δ .

С некоторыми упрощениями длина дуги контакта равна:
для круглого наружного шлифования

$$L_k = \left(1 \pm \frac{v_d}{60v_k} \right) \sqrt{\frac{D_k d S_{пр}}{D_k + d}};$$

для плоского шлифования

$$L_k = \left(1 \pm \frac{v_d}{60v_k} \right) \sqrt{D_k S_{пр}};$$

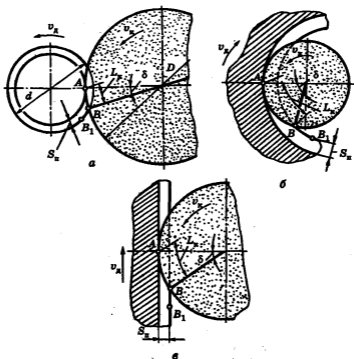


Рис. 10.9. Схема для определения длины дуги контакта круг — деталь при шлифовании

для внутреннего шлифования

$$L_k = \left(1 \pm \frac{v_d}{60v_k} \right) \sqrt{\frac{D_k d S_{\pi}}{d - D_k}}$$

Знак \pm берется при одноименном вращении круга и детали, а \leftarrow — при встречном вращении.

Сопоставляя приведенные выше формулы, можно сделать следующие выводы:

1) абсолютная длина дуги контакта круга с деталью невелика и находится в пределах от нескольких десятых до 1...2 мм;

2) при малых поперечных подачах диаметр шлифовального круга слабо влияет на длину дуги контакта (для глубины 0,005 мм

увеличение диаметра круга в 8 раз увеличивает длину дуги менее чем на 12 %);

3) изменение скорости детали изменяет длину дуги в пределах 1...2 %;

4) основными параметрами, влияющими на длину дуги контакта, являются диаметры круга и детали и глубина шлифования.

Длины дуги контакта при различных видах шлифования находятся между собой в соотношении

$$L_n : L_n : L_n = \sqrt{\frac{D_k d S_n}{D_k + d}} : \sqrt{D_k S_n} : \sqrt{\frac{D_k d S_n}{d - D_k}}$$

В пределах дуги контакта при снятии слоя глубиной t действует одновременно z зерен:

$$z = L_n / l_z,$$

где l_z — условный шаг между зернами, или среднее расстояние между ними.

Среднее расстояние между абразивными зёрнами можно определить по эмпирической формуле [2]

$$l_z = \sqrt[3]{\frac{100\,000}{(62 - 2N)\rho_s n}}, \quad (10.1)$$

где N — номер структуры; ρ_s — плотность абразивного материала (она равна для электрокорунда 3,60...3,77 г/см³, для карбида кремния 3,04...3,14 г/см³); n — количество зерен в 1 г.

Для алмазных кругов среднее расстояние между зёрнами

$$l_z = 0,16 a_0 \sqrt[3]{\mu/k}, \quad (10.2)$$

где a_0 — размер алмазного зерна; k — концентрация алмазов в алмазоносном слое, %; μ — коэффициент, учитывающий заполнение круга связкой и наполнителем:

Концентрация алмазов, %	50	75	100	150	200
Значение μ	8	6	4	3	2

Фактическое расстояние между зёрнами l_f бывает больше подсчитанного по формулам (10.1), (10.2) в связи с беспорядочным расположением зерен на поверхности круга и их разновысотностью. Согласно исследованиям [2], наиболее часто повторяющиеся

расстояние между абразивными зернами равно $l_\phi = 1,75a_0$, где a_0 — размер абразивного зерна. Принимая, что при резании работает не более 50 % зерен, расположенных на рабочей поверхности круга, получим $l_\phi = 3,5a_0$.

С достаточно высокой точностью фактическую глубину резания единичным зерном можно принять равной $t_\phi = nS_n$, где S_n — номинальная подача в направлении линии снятия припуска; n — число проходов, необходимое для установления стабильно повторяющегося микропрофиля шлифованной поверхности.

Установлены следующие значения n для абразивного шлифования [2]:

Зернистость шлифовального круга.....	80	40	25
Значение n	12	10	8

В итоге среднюю толщину слоя, срезаемого одним зерном, можно найти по следующим зависимостям:

для круглого наружного шлифования

$$a_{z\text{ ср}} = \frac{v_\phi l_\phi}{60v_k \pm 2v_d} \sqrt{\frac{(D_k + d)t_\phi}{D_k d} \frac{S_{\text{пр}}}{B_k}}, \quad (10.3)$$

для плоского шлифования

$$a_{z\text{ ср}} = \frac{v_\phi l_\phi}{60v_k \pm 2v_d} \sqrt{\frac{t_\phi}{D_k} \frac{S_{\text{пр}}}{B_k}}, \quad (10.4)$$

для внутреннего шлифования

$$a_{z\text{ ср}} = \frac{v_\phi l_\phi}{60v_k \pm 2v_d} \sqrt{\frac{(D_k - d)t_\phi}{D_k d} \frac{S_{\text{пр}}}{B_k}}, \quad (10.5)$$

Для примера определим $a_{z\text{ ср}}$ при наружном круглом шлифовании цилиндрической детали, если $v_d = 20$ м/мин, $v_k = 30$ м/с; $S_n = 0,01$ мм/дв.ход., $D_k = 300$ мм, $d = 50$ мм, $S_{\text{пр}}/B_k = 0,4$, круг зернистости 40. Для данных условий шлифования $l_\phi = 3,5a_0 = 1,4$ мм, $t_\phi = 10S_n = 0,1$ мм. В соответствии с формулой (10.3) $a_{z\text{ ср}} = 0,3$ мкм.

Как видно из формул (10.3)–(10.5), толщина слоя, срезаемого одним абразивным зерном, увеличивается с ростом окружной скорости детали v_d , поперечной подачи S_n , расстояния между зернами l_ϕ , продольной подачи $S_{\text{пр}}$ и уменьшается с увеличением окружной скорости v_k , диаметра детали d , диаметра круга D_k и его ширины B_k .

Сравним a_z , $a_{z\text{cp}}$ при различных видах шлифования: наружного круглого (рис. 10.9, а), внутреннего (рис. 10.9, б) и плоского (рис. 10.9, в). Круг должен находиться в контакте с образующей отверстия, обращенной в сторону рабочего. Во всех случаях «шаг» между зернами берется постоянным, т.е. $l_{\phi} = \text{const}$, но $L_{\text{к. нар}} < L_{\text{к. пл}} < L_{\text{к. вн}}$. Величина a_z будет обратно пропорциональна $L_{\text{к}}$, т.е. $a_{z\text{ нар}} > a_{z\text{ пл}} > a_{z\text{ вн}}$.

Исследованиями установлено, что абразивное зерно снимает стружку не по всей длине дуги контакта с обрабатываемым металлом. Если представить продольное сечение стружки в виде односторонней или двусторонней запятой, то понятно, что зерно начинает входить в металл с нулевой толщиной среза. Поскольку зерно имеет определенный радиус округления режущей кромки ρ , в начальной стадии оно не может срезать стружку, так как $a_z < \rho$. На этой стадии происходит упругопластическое деформирование металла с выдавливанием его по бокам поперечного сечения царапины, а также вдоль нее (в этих местах образуются своеобразные навалы). В момент, когда глубина внедрения зерна будет близка к ρ , начнется вторая стадия резания-царапания с образованием стружки. Последняя, вероятно, отделяется раньше, чем зерно выйдет из зоны контакта. Следовательно, на некотором участке при выходе зерна из металла резание почти отсутствует (третья стадия). Итак, полезная работа резания осуществляется лишь на второй стадии. Поэтому нужно стремиться к тому, чтобы она занимала как можно большую часть дуги контакта. Для этого следует:

- применять абразивные зерна с меньшим радиусом округления ρ , например алмазные и эльборовые;
- пользоваться более эффективной СОЖ, так как образующиеся в зоне контакта пленки облегчают и ускоряют врезание зерна в металл;
- повышать скорость резания, т.е. работать в зоне скоростного (до $v_k = 60$ м/с) и высокоскоростного ($v_k > 60$ м/с) шлифования.

Силы и мощность резания при шлифовании

При шлифовании различают суммарную силу резания шлифовальным кругом и силу резания-царапания одним абразивным зерном. Рассмотрим только суммарную силу резания R , которая раскладывается на три составляющие (рис. 10.10): главную P_z , радиальную

P_y и осевую P_x . По P_z определяется мощность электродвигателя станка, необходимая для шлифования, по P_y — упругие отжатия (или деформации) детали и круга, влияющие на точность обработки, по P_x — сила, необходимая для продольной подачи круга или детали.

Силу P_z (в ньютонах) определяют по эмпирической формуле

$$P_z = C_{P_z} v_d^{0,7} S_{\text{пр}}^{0,7} S_{\text{п}}^{0,6},$$

где C_{P_z} — коэффициент, характеризующий материал шлифуемой детали и другие условия шлифования; он принимается равным 22 для закаленной стали, 21 для незакаленной и 20 для чугуна.

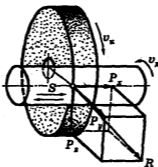


Рис. 10.10. Схема действия сил резания при круглом наружном шлифовании

Для примера подсчитаем силу резания при шлифовании незакаленной стали 40 кругом 14A40НСМ15К5 шириной 40 мм при $v_d = 30$ м/мин, $S_{\text{пр}} = 20$ мм/об и $S_{\text{п}} = 0,009$ мм за двойной ход:

$$P_z = 21 \cdot 30^{0,7} \cdot 20^{0,7} \cdot 0,009^{0,6} \approx 110 \text{ Н.}$$

Экспериментально установлены соотношения между P_z , P_y и P_x :

$$P_y = (1...3)P_z; P_x = (0,1...0,2)P_z.$$

Исследования сил резания позволяют сделать ряд общих выводов для всех случаев шлифования. С увеличением скорости шлифования v_k главная составляющая силы резания несколько увеличивается (до 10 %), в то время как радиальная составляющая возрастает почти прямо пропорционально. При работе с охлаждением сила

резания меньше, чем при работе всухую. При шлифовании с маслом силы резания в 2 раза меньше, чем при применении водных растворов. С уменьшением зернистости круга сила резания, приходящаяся на одно зерно, уменьшается, но вместе с тем суммарная сила резания увеличивается, так как число зерен на единицу длины возрастает пропорционально уменьшению зернистости.

Радиальное давление, приходящееся на зерна, никогда не бывает постоянным, так как число одновременно режущих зерен все время меняется, так же, как и поверхность, занимаемая ими на единице площади. При малом радиальном давлении круг работает в условиях постепенного затупления, вследствие чего режущая способность его постепенно снижается и съем металла уменьшается. С повышением радиальной силы съем металла растет быстрее, чем эта сила, вследствие более интенсивного самозатачивания круга. Шлифование более твердыми кругами протекает обычно с большими силами резания. С увеличением расстояний между зернами, т.е. с увеличением номера структуры, сила резания, приходящаяся на одно зерно, возрастает, а суммарная сила резания уменьшается.

Превышение силы P_y над P_z является следствием того, что удельные силы резания при шлифовании очень велики и, по данным различных исследований, лежат в пределах 100...200 ГПа, т.е. в десятки раз превышают удельные силы резания при точении, сверлении и фрезеровании.

Большие значения удельной силы резания при шлифовании объясняются чрезвычайно малой площадью сечения срезаемого слоя и наличием отрицательного переднего угла у зерен круга. В табл. 10.2 приводятся сравнительные данные средних удельных сил резания для различных видов обработок. Следует отметить, что более крупнозернистому кругу соответствует меньшее значение удельной силы резания.

Таблица 10.2

Удельные силы резания при различных видах обработки

Способ обработки	Удельная сила резания, МПа
Точение	2000...2500
Сверление	3000...3500
Фрезерование	5000...7000
Шлифование	100 000...200 000

Мощность (в киловаттах), необходимая для вращения круга,

$$N_k = P_z v_k / (1000 \eta_1);$$

мощность, затрачиваемая на вращение детали,

$$N_d = P_z v_d / (60 \cdot 1000 \eta_2),$$

где η_1, η_2 — КПД приводов вращения соответственно круга и детали. Так как $v_k/v_d = 60 \dots 100$, то N_d значительно меньше, чем N_k .

Мощность, необходимую для шлифования, можно определить и по эмпирической формуле

$$N = C_N v_d^{0,5} S_{np}^{0,55} S_H^{0,5}.$$

Значения коэффициента C_N для различных видов и условий шлифования приводятся в справочной литературе [3].

Тепловые явления при шлифовании

10.7. и пути управления ими

Особенности теплообмена при шлифовании. Процесс шлифования характеризуется высокими температурами в зоне резания, которые служат причиной появления структурно измененных слоев шлифуемой детали и больших остаточных напряжений. Образующаяся теплота воздействует также на абразивный круг, в результате чего быстро затупляются абразивные зерна, выгорают органические связки, увеличивается износ и снижаются режущие свойства круга.

При шлифовании почти вся механическая мощность микрорезания преобразуется в тепловую и лишь незначительная часть мощности (десятые доли процента) переходит в скрытую энергию изменений кристаллической решетки обрабатываемого материала.

Вся тепловая энергия распределяется между деталью, кругом, стружкой и охлаждающей средой:

$$Q = Q_d + Q_k + Q_c + Q_{o.c.}$$

где Q_d — теплота, переходящая в обрабатываемую деталь; Q_k — теплота, переходящая в круг; Q_c — теплота, переходящая в стружку; $Q_{o.c.}$ — теплота, отводимая охлаждающей средой.

Исследования показывают, что теплота, образующаяся при шлифовании, поглощается в основном обрабатываемой деталью (60...85 %), абразивным кругом (10...13 %) и стружкой (до 30 %) [2]. Указанные соотношения могут изменяться в зависимости от

вида шлифования, физико-механических свойств обрабатываемого материала, характеристик круга, методов подвода СОЖ и т.д.

В литературе приводятся расчетные формулы для определения слагаемых теплового баланса, в частности:

$$Q_k = 0,885 \Theta_{\max} B \sqrt{\lambda_k c_k \rho_k v_d L_k}; \quad (10.6)$$

$$Q_d = 0,885 \Theta_{\max} B \sqrt{\lambda_d c_d \rho_d v_d L_k}, \quad (10.7)$$

где Θ_{\max} — максимальная температура в зоне шлифования; B — ширина круга; λ_k, λ_d — коэффициенты теплопроводности соответственно круга и детали; c_k, c_d — удельные теплоемкости круга и детали; ρ_k, ρ_d — плотности материалов круга и детали; v_d — окружная скорость детали; L_k — длина дуги контакта.

Из дифференциального уравнения теплопроводности можно получить уравнения для расчета температуры на поверхности контакта абразивного зерна с деталью и в глубине детали. Например, максимальная температура в зоне контакта круга с деталью при суммарном воздействии тепловых импульсов от всех зерен, действующих в зоне контакта,

$$\Theta_{\max} = \frac{120 v_k z_\Phi q_1 \sqrt{60 \omega L_k}}{\lambda \sqrt{\pi v_d^3}}, \quad (10.8)$$

где v_k — окружная скорость круга; z_Φ — количество абразивных зерен на единице рабочей поверхности круга; q_1 — средняя напряженность теплового потока от единичного зерна; λ, ω — коэффициенты тепло- и температуропроводности материала детали; L_k — длина контакта круга с деталью; v_d — скорость детали.

В формулах (10.6)–(10.8) не учитывается влияние охлаждения. Количество теплоты, уносимой из зоны контакта стружкой,

$$Q_c = m_c c_c \Theta_c,$$

где m_c — масса снимаемой стружки; c_c — теплоемкость материала стружки; Θ_c — температура стружки в момент резания.

Выше отмечалось, что время контакта единичного зерна крайне мало. Практически так же мало реальное время его остывания, которое в тысячи и десятки тысяч раз меньше, чем полное время остывания. Например, для круга диаметром 500 мм, зернистостью 25, вращающегося с частотой 1400 об/мин, время контакта единично-

го зерна с деталью равно $9 \cdot 10^{-7}$ с, а возможное время остывания — 0,043 с [1]. Сопоставляя времена, легко объяснить факт, что круг при шлифовании всегда остается холодным.

В связи с высокой температурой шлифования на обработанной поверхности могут образоваться шлифовочные прижоги, трещины и другие дефекты, снижающие эксплуатационные свойства деталей, поэтому температурный фактор в процессе шлифования приобретает значение основного [4].

При шлифовании различают: *мгновенную температуру* Θ_m , развивающуюся в зоне микрорезания абразивным зерном и являющуюся высокой и кратковременной; *контактную* Θ_k , устанавливающуюся в зоне контакта круга с деталью; *среднюю* Θ_{cp} , устанавливающуюся на всей обработанной поверхности.

Мгновенную температуру экспериментально измерить крайне трудно, однако с известным приближением ее можно определить косвенным путем, например по структурным превращениям в тончайших граничных слоях шлифуемой детали. При абразивном шлифовании прочных материалов (закаленных сталей и др.) с высокими режимами резания, когда нагрузка на зерна значительна, мгновенная температура может достигать температуры плавления обрабатываемого материала. О высоких мгновенных температурах, развивающихся при шлифовании достаточно прочных материалов, наглядно свидетельствует поток искр, наблюдаемый даже при наличии обильного охлаждения. Такие температуры повышают пластичность обрабатываемого металла и этим благоприятствуют процессу снятия стружек при микрорезании.

Контактная температура меньше мгновенной (особенно при наличии охлаждения) в связи с интенсивным теплоотводом из зоны шлифования в деталь. Интенсивность процесса охлаждения объясняется тем, что нагретый наружный слой детали очень тонкий, а большая масса нижнего слоя имеет низкую температуру. Теплоотвод усиливается при увеличении размеров шлифуемых деталей, зоны контакта круга с деталью, теплопроводности связки и шлифующих зерен, теплоемкости СОЖ и т.д.

Средняя установившаяся температура поверхности ниже контактной температуры, и она влияет в основном на точность линейных размеров и формы детали.

При абразивном шлифовании средняя температура детали изменяется в пределах 20...350 °С, контактная — в пределах 200...1100 °С и мгновенная — от 1000 °С до температуры плавления обрабатываемого металла [2].

При алмазном шлифовании мгновенные, контактные и средние температуры, как правило, бывают ниже, чем при абразивном шлифовании. Это вызвано:

1) сравнительно небольшим объемом и низкой степенью пластической деформации обрабатываемого материала в результате меньших нагрузок на алмазные зерна, их большей твердости и жесткости по сравнению с абразивными;

2) более низким коэффициентом трения алмазных зерен по сравнению с абразивными, обеспечивающим снижение сил и работы трения;

3) более высокой теплопроводностью алмаза по сравнению с абразивом.

Как возникновение, так и распределение теплоты в процессе шлифования зависят от всех условий обработки: характеристики круга, элементов режима резания, механических и теплофизических свойств материала детали, свойств СОЖ и др.

При увеличении нагрузки на зерно в зоне его работы выделяется большее количество теплоты в единицу времени, и это обеспечивает рост температуры. Нагрузка на зерно возрастает при увеличении окружной скорости детали и подачи (поперечной и продольной).

С ростом скорости шлифовального круга температура поверхности шлифуемой детали уменьшается, о чем свидетельствует опыт скоростного шлифования. Падение температуры вызвано тем, что с увеличением скоростей резания уменьшается время контакта круга с деталью и улучшаются условия теплоотвода.

При увеличении твердости, плотности структуры и зернистости шлифовального круга температура возрастает, поскольку при таких условиях шлифования в единицу времени снимается большее количество стружек, т.е. затрачивается большая работа, а на удаление затупившихся зерен твердого круга также необходимо затрачивать больше усилий.

Увеличение размеров шлифуемой детали способствует более интенсивному отводу теплоты. Это необходимо учитывать, особенно при шлифовании деталей из закаленных сталей, теплопроводность которых после закалки снижается, а также при шлифовании деталей из легированных сталей. Детали, имеющие меньшие диаметр и массу, хуже отводят теплоту, поэтому поверхности их больше склонны к возникновению прижогов и образованию трещин.

Температура при шлифовании снижается как при уменьшении мощности источников теплообразования, так и при повышении интенсивности теплоотвода. Поэтому важно наметить конкретные

пути снижения теплонапряженности обработки металлов шлифованием.

Пути управления тепловыми процессами при шлифовании. Режим теплового насыщения в зерне наступает за очень короткое время — 5...100 мкс. Абразивным зерном теплота активно отводится из зоны резания в течение только этого времени. При достижении режима теплового насыщения тепловая активность зерна резко падает.

Управлять балансом теплоты можно путем изменения теплоемкости применяемых СОЖ. Для увеличения эффекта охлаждения круга необходимо отводить перешедшую в него теплоту в тот момент, когда она еще не успела распространиться в глубину инструмента, т.е. в момент выхода точек круга из зоны резания. В этом случае теплота переходит из круга в жидкость, не успев оказать вредного воздействия на материал связки и зерна. В связи с этим одним из эффективных методов подвода СОЖ является двухструйное охлаждение, когда одна струя направлена в место входа круга в зону контакта с деталью, а вторая — в место выхода его из этой зоны.

Одним из путей регулирования баланса теплоты при шлифовании является управление активной технологической средой в зоне резания. Эта цель достигается, например, пропиткой изготовленного абразивного инструмента специальными растворами или введением в абразивную массу перед ее формированием специальных наполнителей. В качестве наполнителей применяют как металлы (алюминий, никель, медь и др.), так и неметаллы (криолит, асбест, пирит, алебастр). Известно, что с увеличением тепловой активности круга возрастает количество теплоты, уносимой им из зоны резания. Поэтому введение металлических наполнителей улучшает режущие способности абразивного инструмента.

Одним из путей, увеличивающих тепловую активность абразивного круга и количество теплоты, уносимой им из зоны резания, является применение химически активных сред, обеспечивающих протекание в зоне контакта химических реакций с поглощением большого количества теплоты. Предварительные расчеты и эксперименты показали, что некоторые вещества при нагревании диссоциируют с поглощением теплоты и могут быть успешно применены, например, в качестве наполнителей абразивных масс. Тепловой эффект этих реакций различен и составляет 90...460 кДж/моль. Таким путем можно обеспечить режимы бесприжогового шлифования. Опыт показывает, что при использовании химически активных на-

полнителей, обеспечивающих эндотермический эффект в зоне контакта, можно повысить режущие свойства кругов и улучшить основные показатели обработки до 30 % [7].

Действие технологической среды

10.8. при шлифовании

Физико-химические явления в зоне действия технологической среды. Значительный интерес представляет рассмотрение процесса шлифования с точки зрения химических превращений, происходящих в зоне контакта инструмента и детали, роли среды в изменении скорости этих превращений и теплового баланса [7]. Особенно важно учитывать это при обработке нержавеющей сталей и жаропрочных сплавов, которые при температурах шлифования имеют химическое сродство с абразивным материалом и медленно образуют оксидные пленки на ювенильных поверхностях, что приводит к молекулярному схватыванию поверхностей и повышенному износу круга.

Износ круга может быть снижен, если на ювенильных поверхностях металла создать искусственные защитные пленки, которые препятствовали бы взаимодействию обрабатываемого материала с абразивом и стружкой. Такие пленки могут быть получены введением в состав материала круга или охлаждающую жидкость веществ, способных вступать в реакцию с обрабатываемым материалом при температурах зоны шлифования с выделением серы, хлора и фтора. Образующиеся при этом сульфидные, хлоридные или фтористые пленки существенно облегчают процесс шлифования. В качестве наполнителя шлифовального круга, выделяющего в зоне резания фтор, успешно применяют криолит. Например, добавка криолита в круги на бакелитовой связке улучшает режущие свойства абразивного инструмента и уменьшает вероятность образования шлифовочных прижогов.

Еще более эффективен наполнитель, состоящий из смеси сульфида цинка и солей щелочных металлов серной, соляной или бромисто-водородной кислоты в определенных пропорциях. Даже незначительное содержание сульфида цинка (5...10 % от содержания соли) существенно повышает производительность шлифования [7].

В качестве наполнителя круга на бакелитовой связке может быть успешно применен сульфид сурьмы, проявляющий эффект

смазывания в интервалах температур шлифования. Этот наполнитель облегчает процесс резания, увеличивает стойкость абразивного инструмента, уменьшает засаливание круга, ослабляет химическое взаимодействие абразива и обрабатываемого металла. Положительное влияние сульфида сурьмы начинает проявляться при содержании его 10 % от массы органической связки.

Взаимодействие абразивного круга и детали с потоком СОЖ при шлифовании. Для раскрытия механизма действия СОЖ, а следовательно, и повышения эффективности ее использования важное значение имеют исследования гидро- и аэродинамических явлений, протекающих в зоне контакта шлифовального круга с обрабатываемым изделием. Ниже приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований процессов, происходящих в зоне обработки в связи с движением жидкостных и воздушных потоков [4].

В ходе исследований установлен характер распределения гидродинамического давления $p(x)$ СОЖ в зоне между шлифовальным кругом и обрабатываемой поверхностью (рис. 10.11). В сужающейся по ходу вращения круга части контактной зоны образуется гидравлический клин с избыточным давлением СОЖ, а в расширяющейся части развивается отрицательное (вакуумное) давление жидкости. Точка a осциллограммы соответствует моменту касания потока СОЖ рабочей поверхности шлифовального круга. На расстоянии от оси круга, большем x_2 , центробежные и вихревые потоки воздуха, создаваемые инструментом, отбрасывают жидкость от его рабочей

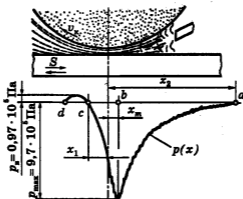


Рис. 10.11. Характер распределения давления в гидравлическом клине при плоском шлифовании

поверхности. Постепенное увеличение гидродинамического давления приводит к разрушению воздушной оболочки, и СОЖ затягивается абразивным кругом в постепенно сужающуюся щель по направлению к зоне резания. В точке b с координатой x_m гидравлическое давление достигает максимума. В точке c с координатой x_1 давление СОЖ падает до нуля, и на участке cd образуется разреженное пространство вследствие расширения жидкости и воздуха, сжатого в порах круга в момент прохождения через зону резания, при попадании их в диффузорную часть контактной зоны. При этом достаточно точно соблюдается соотношение $x_m = x_1/2$.

В наибольшей степени гидродинамическое давление СОЖ зависит от материала связки шлифовального круга. Сравнение давления при шлифовании кругами на вулканитовой и керамической связках показывает, что в первом случае оно намного выше при одинаковой зернистости. Это объясняется тем, что вследствие податливости вулканитовой связки при шлифовании происходит уменьшение расстояния от нее до обрабатываемой поверхности, и в результате жидкость сильнее сжимается между кругом и деталью. Кроме того, круги на вулканитовой связке почти не содержат пор и создают менее интенсивные по сравнению с керамическими воздушные потоки, ослабляющие в некоторой степени гидродинамический эффект.

Гидродинамическое давление СОЖ возрастает при уменьшении зернистости инструмента. Происходит это вследствие того, что, во-первых, уменьшается зазор между связкой круга и обрабатываемой поверхностью и, во-вторых, снижается давление воздушного потока из-за уменьшения шероховатости абразивной поверхности круга.

Анализ физических явлений в гидравлическом клине позволяет сделать следующие выводы. СОЖ достаточно свободно проникает в зону контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью, так как аэродинамический поток, создаваемый вращающимся шлифовальным кругом, не может существенно препятствовать этому. Это подтверждается также результатами измерения давления воздушного потока, которое было меньше гидродинамического давления СОЖ и не превышало в экспериментах $3,24 \cdot 10^2$ Па [4]. Очевидно, что воздушный поток способен лишь в некоторой степени ослаблять гидродинамические процессы.

СОЖ в зону контакта шлифовального круга с обрабатываемым изделием проникает, во-первых, в результате затягивания ее абразивным кругом в узкую часть клинообразной щели, во-вторых,

вследствие образования разреженного пространства за зоной резания по направлению вращения круга. В разреженное пространство устремляется жидкость от торцов круга, образуя в непосредственной близости от зоны резания поток СОЖ, охлаждающей поверхности круга и детали. СОЖ остается в зоне разрежения еще некоторое время после прекращения подачи и не выбрасывается шлифовальным кругом.

При обильной подаче СОЖ в зону контакта появляется противоток, т.е. жидкость устремляется в направлении, противоположном направлению вращения шлифовального круга. Она встречает на своем пути как бы преграду в виде гидравлического клина. Это свидетельствует о том, что чрезмерное увеличение расхода подаваемой СОЖ не улучшает условий проникновения ее в зону резания, и подтверждается результатами измерения гидродинамического давления СОЖ [4]. При увеличении расхода СОЖ сверх оптимального ее гидродинамическое давление остается неизменным, а следовательно, не меняются и условия проникновения СОЖ в зону резания. В то же время наличие противотока вызывает усиление моющего действия СОЖ, так как жидкость, движущаяся навстречу шлифовальному кругу, лучше вымывает его поры от отходов шлифования. Этим в некоторой степени можно объяснить повышение качества обработанной поверхности при увеличении расхода подаваемой СОЖ.

Можно предложить следующие методы интенсификации охлаждения зоны резания:

□ использование крупнозернистых кругов, что будет способствовать увеличению расстояния от связки до обрабатываемой поверхности;

□ применение СОЖ, имеющих низкую вязкость;

□ увеличение скорости вращения круга и гидродинамического давления СОЖ.

Одним из методов повышения гидродинамического давления является применение СОЖ, образующих на рабочей поверхности круга масляную пленку, в результате чего улучшается его смачиваемость и ослабляется действие воздушных потоков. Применение таких жидкостей — эффективный метод улучшения условий проникновения СОЖ в зону резания.

Описанные явления характерны не только для плоского шлифования периферией круга. При наружном и внутреннем круглом шлифовании также образуется гидравлический клин, но давление в нем будет иным вследствие изменения формы клина между кру-

гом и обрабатываемой поверхностью. При внутреннем шлифовании гидродинамическое давление СОЖ может быть приблизительно в 1,5 раза выше, чем при плоском, а при наружном — в 1,4 раза ниже. Гидро- и аэродинамические явления могут существенно влиять на условия протекания процесса шлифования. Их использование, очевидно, позволит вскрыть новые резервы повышения эффективности абразивной обработки.

Механизм проникновения СОЖ в зону шлифования при охлаждении через поры шлифовального круга. Рассматриваемый метод охлаждения зоны резания является наиболее эффективным, так как СОЖ подводится именно в нее. При этом имеет место гарантированное проникновение СОЖ не только в зону шлифования, но и в места непосредственного контакта абразивных зерен с обрабатываемым металлом в момент снятия стружки [8].

В процессе протекания СОЖ по поровым каналам круга происходит ее деление на струйки, так как количество пор на периферийной поверхности круга в несколько раз больше, чем на внутренней. СОЖ выходит из пор круга в виде мельчайших частиц, т.е. в распыленном состоянии. Частицам жидкости в момент вылета из пор круга сообщается значительная кинетическая энергия. В момент перехода СОЖ в распыленное состояние ее температура значительно снижается и, хотя химический состав СОЖ остается неизменным, физико-химические свойства ее изменяются. В результате диспергирования и движения с большой скоростью частицы распыленной СОЖ приобретают запас свободной энергии, вследствие чего возрастает их химическая активность.

При распылении СОЖ происходит ее электризация, что приводит частицы СОЖ в ионное состояние и усиливает их химическую активность и склонность к адсорбции на поверхности абразива и металла. Проведенные опыты по измерению электризации металлических деталей, внесенных в струю распыленной СОЖ [8], показали, что интенсивность электризации зависит от физико-электрических свойств СОЖ, скорости истечения распыленной жидкости и расстояния между источником распыленной СОЖ и металлической деталью. При этом установлено, что дистиллированная вода, являясь в обычных условиях диэлектриком, при распылении ионизируется и становится носителем электрических зарядов. Проникновению СОЖ в зону шлифования способствует ультразвуковой эффект. Суть его состоит в том, что при шлифовании в результате ударного действия абразивных зерен каждый элементарный объем металла, абразива, связки и СОЖ пронизывается множеством упру-

гих волн, идущих в различных направлениях. Исследования показали, что наличие в зоне резания колебаний ультразвуковой частоты в 40–50 раз повышает скорость прохождения СОЖ по капиллярам или капиллярно-пористому телу.

Шлифование с охлаждением через поры круга резко снижает вероятность появления на обработанной поверхности шлифовочных прижогов, а производительность повышается в 1,3–1,5 раза. Максимальные режимы, определяемые режущей способностью круга, как правило, выше, чем режимы бесприжогового шлифования. При подаче СОЖ через поры режущая способность круга в силу отсутствия его засаливания значительно повышается. При этом режимы бесприжогового шлифования приближаются к режимам, которые лимитируются режущей способностью шлифовального круга.

Установлен ряд особенностей шлифования с охлаждением через поры круга, благодаря которым этот процесс существенно отличается от шлифования при обычном охлаждении. При подаче СОЖ через поры круга имеет место так называемый *фильтрационный эффект* (закупоривание пор паровоздушными пузырьками, которые препятствуют протеканию СОЖ через поры). Для устранения этого недостатка необходимо подавать СОЖ под избыточным давлением (30...50 кПа). При таком давлении обеспечивается заполнение всего порового пространства шлифовального круга [8], благодаря чему улучшается теплоотвод и достигается максимальная эффективность по устранению или снижению прижогов. При меньшем расходе СОЖ повышается вероятность появления абразивных зерен, к которым она не поступает. Такие зерна могут вызвать штриховой ожог на шлифуемой поверхности. Подача СОЖ под более высоким давлением также нежелательна, поскольку в этом случае увеличиваются статическая и динамическая нагрузки на шлифовальный круг. Опыт показывает, что для шлифования с охлаждением через поры круга пригодны в основном круги на керамической связке. Кроме того, при всех условиях рассмотренный метод охлаждения требует более тщательной очистки СОЖ от шлама.

Кавитационные явления в зоне резания при шлифовании. Образование гидравлического клина создает условия, предопределяющие кавитацию и все сопровождающие ее явления [5]. Здесь имеются жидкая среда и движущиеся относительно нее два твердых тела — шлифовальный круг и деталь, причем скорости относительного перемещения весьма высокие (30 м/с и более). Вследствие малой толщины слоя жидкости (0,005...0,025 мм) интенсивность кавитации значительно возрастает.

Гидродинамическая кавитация при шлифовании вызвана относительным перемещением с большой скоростью труднообтекаемых абразивных зерен и СОЖ. Абразивные зерна могут быть уподоблены лопаткам гидротурбины в миниатюре. При их движении происходят разрывы сплошности потока СОЖ, возникает кавитация. Парогазовые пузырьки, образующиеся при движении отдельных абразивных зерен, частично вытесняются к торцам круга и не влияют на процесс шлифования. Основная же масса их уносится потоком жидкости к зоне резания, где они объединяются в кавитационное облако, состоящее из отдельных пузырьков, диаметр которых достигает нескольких десятых долей миллиметра. Время существования их ничтожно, так как под действием повышенного давления в гидравлическом клине происходит захлопывание пузырьков [5].

Причиной возникновения кавитации в потоке жидкости может быть местное падение давления ниже атмосферного. Как отмечалось, измерение давления в гидравлическом клине показало, что за зоной резания в направлении вращения шлифовального круга, т.е. в расширяющейся части клина, развиваются отрицательные давления (разрежение). Это происходит благодаря расширению жидкости, а также воздуха, сжатого в порах круга при прохождении через зону резания. Здесь также образуются и захлопываются кавитационные пузырьки.

Проведенные исследования позволили расширить представления о механизме действия СОЖ. Кроме охлаждающего, смазочного, моющего и режущего действия СОЖ оказывает кавитационное воздействие на процесс шлифования. Последнее заключается в термомеханическом воздействии на абразивный круг и обрабатываемую поверхность и повышении физико-химической активности СОЖ.

При захлопывании кавитационный пузырек с большой скоростью генерирует волну, которая вызывает ударное взаимодействие жидкости и твердого тела. Давление в окрестностях пузырька достигает примерно 200...350 МПа, а температура — 1000...1200 °С. При контакте бесчисленного множества пузырьков жидкости с поверхностью твердого тела последняя разрушается.

Установлено, что под влиянием кавитации, вызванной наложением ультразвуковых колебаний на струю СОЖ, происходит повышение физико-химической активности СОЖ и улучшение всех ее функциональных свойств — смазочных, моющих, охлаждающих. В результате повышается период стойкости абразивного круга, улучшаются физико-механические свойства обработанной поверхности, снижается ее шероховатость.

Изнашивание и стойкость шлифовальных

10.9. кругов

Характер изнашивания зерен шлифовальных кругов. В начальный период работы круга на вершинах зерен образуются площадки износа, которые непрерывно увеличиваются. При достаточной прочности зерен и связки площадки износа на зернах могут достигнуть значительных размеров.

Работа трения и пластического деформирования с возрастанием температуры контактирующих поверхностей увеличивается. Одновременно с изнашиванием зерен круга происходит изменение рельефа его рабочей поверхности.

В зависимости от условий шлифования (физико-механических свойств зерен, обрабатываемого материала и связки, режима обработки и др.) различают следующие основные виды изнашивания:

- истирание режущих элементов (вершин) шлифующих зерен с образованием на них площадок с большей или меньшей шероховатостью (рис. 10.12, а);
- микроразрушение (расщепление) зерен с отделением от них небольших частиц (рис. 10.12, б);
- разрушение зерен с отделением от них крупных частиц, размеры которых соизмеримы с размером зерна (рис. 10.12, в);
- полное вырывание зерен из связки (рис. 10.12, г);

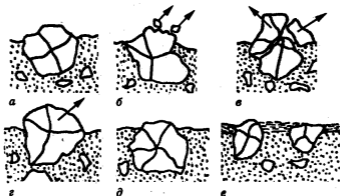


Рис. 10.12. Основные виды износа шлифовального круга [2]

□ разрушение в результате протекания химических реакций в зоне контакта зерна с обрабатываемым материалом (рис. 10.12, *д*) при высоких температурах, развивающихся в зоне шлифования;

□ забивание промежутков между зернами (пор) стружкой и продуктами изнашивания (рис. 10.12, *е*).

Одновременно с изнашиванием зерен происходит изнашивание (истирание) связки в поверхностных слоях круга.

Расщепление и разрушение зерна происходит до тех пор, пока оно не будет выступать из связки примерно на $l_0/6$, где l_0 — размер зерна в поперечнике (рис. 10.13). В этом случае элементарная сила резания, действующая на абразивное зерно, недостаточна для его дальнейшего расщепления; зерно окончательно сглаживается и теряет свои режущие свойства. Резание-царапание прекращается, и между кругом и деталью имеет место трение скольжения с выделением большого количества теплоты, что свидетельствует о полном затуплении круга. При повышенном режиме (предварительное шлифование), когда нагрузка на абразивное зерно значительна, наблюдается откалывание от зерна более крупных его элементов.

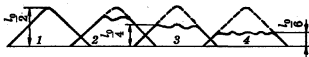


Рис. 10.13. Стадии износа (1–4) зерна при шлифовании

При высоких температурах шлифования, снижающих твердость материала шлифующих зерен, процессы изнашивания зерен интенсифицируются. Адгезионное изнашивание характеризуется кратерами, образующимися на поверхности зерна и свидетельствующими об отрыве или срезе его отдельных частиц. Возможен также перенос частиц обрабатываемого материала на поверхности шлифующих зерен в виде наростов, характерных для шлифования сплавов с аустенитной структурой. В этом случае процесс резания резко ухудшается, так как адгезия переходит в когезию — трение однородных материалов.

Интенсивность изнашивания шлифующих зерен резко возрастает при наличии химического сродства зерна и обрабатываемого материала. Для железоуглеродистых сплавов предпосылками к диффузионному изнашиванию являются высокие температуры в зоне шлифования, легкость растворения углерода в железе, перепад

концентрации углерода между шлифующим зерном и обрабатываемым металлом и контакт их ювенильных поверхностей.

Зерна изнашиваются сильнее при контакте не абразивного и обрабатываемого материалов, а их химических соединений. На поверхности металла чрезвычайно быстро образуются тончайшие пленки оксидов толщиной $(10...15) \cdot 10^{-10}$ м, которые прекращают дальнейшее окисление металла. Для образования пленки оксидов на поверхности металла в совершенно сухом воздухе требуется весьма незначительный промежуток времени: для железа — 0,05 с, меди — 0,11 с, свинца — 0,47 с и т.д. После образования пленки оксидов фактически не увеличиваются. Абразивные зерна, непрерывно отрывая пленку оксидов, покрывающую металл, обнажают «свежий» металл для действия на него кислорода или других химических реагентов, и этим интенсифицируют изнашивание.

Условия работы шлифовальных кругов. Изнашивание рабочей поверхности круга при шлифовании является сложным физико-химическим и механическим процессом, протекание которого зависит от всех условий обработки: характеристики круга, свойств обрабатываемого материала, режима резания и др. В зависимости от этого круги могут работать с самозатачиванием и затуплением [2].

Затупление круга происходит в результате обламывания «невыгодно» расположенных шлифующих зерен, последовательного их расщепления и образования площадок износа, когда зерна теряют свои режущие свойства.

Самозатачивание круга заключается в том, что по мере затупления шлифующих зерен возросшее сопротивление резанию вырывает (полностью или частично) их из связки, которая выкрашивается; при этом в работу вступают новые зерна, в результате чего рабочая поверхность круга непрерывно обновляется. Способность к самозатачиванию является отличительным свойством шлифовального круга.

Обычно круги работают с затуплением, а не с самозатачиванием. С самозатачиванием работают мягкие круги, предназначенные для обработки твердых материалов. При высоких требованиях к точности формы детали, например при чистовом шлифовании фасонных деталей методом врезания, самозатачивание вредно, так как при работе круг очень быстро теряет необходимую форму профиля. В случае, когда необходимо обеспечить высокопроизводительное бесприжоговое шлифование, самозатачивание круга желательно.

Правка шлифовальных кругов. Правка круга производится для восстановления режущей способности его зерен при их затуплении

либо с целью восстановления профиля (для фасонных кругов). Правка может быть алмазной и безалмазной. Толщина снимаемого слоя при правке составляет около 0,08 мм. Алмазная правка производится алмазом в виде одного зерна (0,20...0,25 карата), закрепленного в оправке, или с помощью алмазных карандашей, в которых в специальном вольфрамомедноалюминиевом сплаве заделывается несколько алмазных зерен. Рекомендуемый режим алмазной правки: v_k — принятая; продольная подача $S_{пр} = 0,06...0,6$ м/мин; поперечная подача в направлении оси круга $S_x = 0,005...0,08$ мм на одинарный ход круга; число проходов черновых $i_{черн} = 2...3$, чистовых $i_{чист} = 1...2$.

Безалмазная правка осуществляется с помощью: монолитных дисков, состоящих из зерен твердого сплава ВКЗ-М или ВК6-М, сцементированных латунью; металлических дисков и звездочек из закаленных сталей ПХ15 или 20Х; абразивных дисков из карбида кремния черного на керамической связке. Правку производят обкатыванием или шлифованием при $S_{пр} = 0,6...1,2$ м/мин, $S_x = 0,01...0,03$ мм за один ход, числе проходов выхаживания $i = 3...5$; скорости вращения абразивных дисков приравняются к скоростям вращения заготовки. Алмазная и безалмазная правка проводится с обильным охлаждением.

Стойкость шлифовальных кругов. Время работы круга между двумя его смежными правками при заданных режимах называется *периодом стойкости круга*. Ориентировочно этот период (в минутах) может быть принят по табл. 10.3.

Таблица 10.3

Рекомендуемые периоды стойкости шлифовальных кругов

Вид шлифования	Время работы круга между двумя правками, мин
Круглое наружное:	
с продольной подачей напроход	40
с продольной подачей в упор	30
врезанием	30
врезанием с одновременным шлифованием галтели	20
Бесцентровое:	
с продольной подачей	60
врезанием	30
Внутреннее	10
Плоское периферией круга	25
Плоское торцом круга	10
Фасонное	10

Для повышения производительности процесса шлифования желательно выбирать шлифовальные круги увеличенного диаметра. При этом на рабочей поверхности круга большего размера располагается большее количество режущих зерен; следовательно, при сохранении нагрузки на одно зерно можно повысить производительность шлифования. В случае применения кругов больших диаметров уменьшается их размерный износ и его влияние на изменение скорости резания, повышается период стойкости круга.

Эмпирическая зависимость между периодом стойкости круга (в минутах) и элементами режима шлифования имеет следующий вид:

$$T = \frac{C_T d^{0,6}}{v_d^{1,82} S_{пр}^{1,82} S_n^{1,1}},$$

где C_T — коэффициент; d — диаметр детали; v_d — скорость вращения детали; $S_{пр}$ — продольная подача; $S_n^{1,1}$ — поперечная подача за один двойной ход.

В свою очередь, скорость вращения детали при $v_k = 20 \dots 40$ м/с можно рассчитывать исходя из периода стойкости круга по формуле

$$v_d = \frac{C_v d^y}{T^m S_{пр}^z S_n^x},$$

где C_v — коэффициент; y, m, z, x — показатели степени.

С увеличением диаметра детали период стойкости круга несколько растет, так как при этом уменьшается толщина среза a_z .

Эффективность процесса шлифования.

10.10. Выбор шлифовальных кругов

Эффективность процесса шлифования. Для оценки эффективности шлифования и качества шлифовальных кругов используют различные показатели:

- 1) производительность процесса обработки, определяемая объемом снятого материала Q_m , мм³/мин;
- 2) износ инструмента, определяемый расходом абразивного круга Q_a , мм³/мин;
- 3) удельная производительность процесса обработки $g = Q_m / Q_a$;
- 4) период стойкости инструмента T , мин;

5) шероховатость обработанной поверхности Ra , мкм.

Удельная производительность обработки алмазным инструментом определяется количеством снятого (сошлифованного) материала, приходящегося на единицу массы или объема израсходованных зерен:

$$g = \frac{G_m}{G_z} \text{ (г/мг) или } g = \frac{Q_m}{Q_z} \text{ (см}^3\text{/мг),}$$

где G_m , Q_m — соответственно масса и объем снятого материала; G_z , Q_z — масса и объем израсходованных зерен.

Удельная производительность — важный показатель эффективности процесса, хотя и не отражает полностью условия обработки. В связи с этим часто используются такие критерии, как период стойкости инструмента, шероховатость обрабатываемой поверхности, а также различные дополнительные критерии: силы и мощности резания, температура шлифования и др.

В отдельных случаях за критерий эффективности шлифовальных кругов принимают способность его режущей поверхности внедряться в обрабатываемый материал под действием нормальной силы P_y . Иногда в качестве основного показателя процесса шлифования используют коэффициент шлифования P_z/P_y , характеризующий процесс более полно по сравнению с другими показателями, взятыми в отдельности (удельная производительность, съем материала, мощность и др.).

Расчетный минутный съем материала

$$Q_p = v_d S_n S_{пр},$$

где v_d — скорость детали; S_n — подача в направлении снятия припуска; $S_{пр}$ — продольная подача.

Однако фактический минутный съем $Q_{ф}$ всегда меньше его расчетного значения Q_p , определяемого заданным режимом обработки.

Отношение $Q_{ф}/Q_p < 1,0$ характеризует эффективность реального процесса шлифования. При шлифовании труднообрабатываемых сплавов в ряде случаев эффективность шлифования $Q_{ф}/Q_p < 0,5$. Фактический минутный съем при шлифовании

$$Q_{ф} = \epsilon v_d S_n S_{пр},$$

где ϵ — коэффициент эффективности шлифования.

На эффективность шлифования влияют:

1) нормальная составляющая P_y силы резания, жесткость j технологической системы и толщина δ слоя материала, снимаемого

с детали, влияние которых учитывается показателем эффективности шлифования

$$\varepsilon_j = 1 - P_y / (j\delta);$$

2) удельная производительность процесса g и отношение K_c площади обрабатываемой поверхности детали к площади рабочей поверхности шлифовального круга, влияние которых учитывается показателем

$$\varepsilon_\Delta = g / (g + K_c);$$

3) период стойкости T шлифовального круга и время его правки τ , влияние которых учитывается показателем эффективности шлифования

$$\varepsilon_\tau = T / (T + \tau).$$

В реальном процессе шлифования значение каждого из показателей эффективности процесса (ε_j , ε_Δ , ε_τ), действующих одновременно и независимо друг от друга, всегда меньше единицы, и это является причиной снижения фактической производительности.

В соответствии с отдельными составляющими эффективности процесса шлифования фактический съем материала определяется по формуле [2]

$$Q_\Phi = \varepsilon_j \varepsilon_\Delta \varepsilon_\tau Q_p = \left(1 - \frac{P_y}{j\delta}\right) \left(\frac{g}{g + K_c}\right) \left(\frac{T}{T + \tau}\right) v_k S_n S_{лр}.$$

По приведенной формуле легко определить пути повышения производительности процесса шлифования: повышение жесткости технологической системы, увеличение размера одновременно обрабатываемых поверхностей детали, снижение времени на правку круга и др.

Выбор шлифовальных кругов. На основании заводского опыта и многочисленных исследований рекомендуется для шлифования сталей, ковкого чугуна и заточки режущего инструмента применять электрокорунд, для серого чугуна, бронзового и алюминиевого литья — карбид кремния черный, для твердых сплавов — карбид кремния зеленый или черный.

Круги с более крупным зерном выбираются при черновом шлифовании, а также при обработке мягких и вязких металлов, чтобы предотвратить засаливание. Зернистость абразивных зерен 12, 16, 20, 25, 32 и 40 обеспечивает хорошее качество обработанной поверхности при шлифовании большинства деталей общего машиностроения и заточке инструмента. Для грубых работ выбирают зернистость 50 и выше, а для обеспечения высокой точности и низкой шероховатости зернистость должна составлять 3...10.

Наибольшее распространение в абразивных кругах получила керамическая связка. Вулканитовая и бакелитовая связки применяются для точных чистовых работ, а также для изготовления тонких кругов, предназначенных для разрезания деталей.

Алмазные круги в промышленности наиболее широко применяются на связках В1, В2 и В3. Круги на связке В1 обеспечивают высокую производительность и умеренный расход алмазов на доводочных операциях и при чистовом шлифовании твердых сплавов и хрупких материалов. Однако эту связку, как и другие бакелитовые связки, не рекомендуется использовать при интенсивных режимах резания, так как она чувствительна к воздействию высоких температур, с повышением которых резко возрастает расход алмазов.

Для обеспечения низкой шероховатости обработанной поверхности (до $Ra = 0,04 \dots 0,02$ мкм) рекомендуется применять алмазные круги на связках В1 и В3, а в случае обработки деталей повышенной точности, например профильных, резьбовых и других, когда требуется высокая размерная стойкость инструмента, — алмазные круги на связке В2.

Круги на связке М1 применяются для шлифования деталей из керамики, стекла и других хрупких материалов. Для обработки твердосплавных деталей штампов и пресс-форм рекомендуются круги на связке М5. Режущая поверхность этих кругов имеет открытую пористую структуру. Алмазные зерна более обнажены, чем в связке М1, а удельный расход алмазов для кругов на связке М5 при заточке твердых сплавов в 1,5–3 раза меньше по сравнению с кругами на связке М1.

Повышенными износостойкостью и режущей способностью обладают круги на связках М013, МС1, М5-4, МС6, МВ1 и др. Кругами на металлосиликатных связках МС6 и МС1 можно обрабатывать твердые сплавы без охлаждения.

Из керамических связок наиболее часто применяются связки К1 и К5. Их основой являются легкоплавкое стекло и огнеупорная глина. В качестве наполнителя используется порошок карбида бора. Алмазные круги на керамических связках К1 и К5 предназначены для обработки твердосплавных пластин одновременно с обработкой стальной державки.

Твердость кругов должна обеспечивать частичное самозатачивание их в работе. Чем тверже обрабатываемый материал, тем скорее режущие зерна круга затупляются, тем мягче должен быть шлифовальный круг. Крупнозернистые круги должны иметь более высокую твердость, так как на каждое зерно приходится большая сила,

чем на зерна мелкозернистых кругов. При выборе твердости круга следует учитывать одно важное обстоятельство: истинная твердость круга в процессе шлифования во многом зависит от скорости его вращения. С повышением скорости круг приобретает так называемую динамическую твердость, т.е. ведет себя в процессе резания как более твердый.

Почти все операции шлифования обеспечиваются кругами твердостью М2...СТ3, а именно: заточка твердого сплава и быстрорежущей стали — М3...СМ2, обдирочное шлифование — СТ1...СТ3, полустивое и чистовое шлифование — М2...С2.

Пористость шлифовального круга должна быть тем больше, чем пластичнее обрабатываемый материал, больше глубина шлифования и длина дуги контакта круг — деталь. Правильно подобранная структура круга предохраняет его от засаливания, т.е. обеспечивает хороший выход стружки. Для круглого наружного, внутреннего, плоского шлифования периферией круга и для заточки инструмента из быстрорежущей стали рекомендуется использовать круги структуры № 5, 6, для плоского шлифования торцом круга, отрезания и шлифования твердых сплавов — № 7–9, для фасонного шлифования — № 3, 4.

10.11. Выбор режимов шлифования

Оптимальным режимом резания при шлифовании следует считать режим, который обеспечивает высокую производительность, наименьшую себестоимость и получение требуемого качества шлифованной поверхности [2, 6]. Для определения режима шлифования следует:

1) выбрать характеристику шлифовального круга и установить его окружную скорость v_n ;

2) назначить подачу в направлении снятия припуска (поперечную подачу) и определить число проходов, обеспечивающих снятие всего припуска. Подача варьируется в пределах 0,005...0,09 мм за двойной ход. Значения поперечной подачи для обработки некоторых конструкционных материалов приведены в табл. 10.4;

3) назначить продольную подачу при круглом шлифовании и подачу вдоль оси шлифовального круга при плоском шлифовании в долях ширины круга $S_{пр} = KB$, где $K = 0,4...0,6$ для черного шлифования; $K = 0,3...0,4$ для чистового шлифования;

Таблица 10.4

Предельные значения поперечной подачи, мм за двойной ход

Материал детали	Чистовое шлифование	Черновое шлифование
Сталь закаленная	0,005...0,010	0,01...0,06
Сталь незакаленная	0,006...0,020	0,02...0,08
Чугун	0,008...0,030	0,03...0,09

4) выбрать окружную скорость детали v_d . При черновом шлифовании следует исходить из установленного периода стойкости круга ($T = 25...60$ мин), при чистовом — из обеспечения заданной шероховатости поверхности. Обычно скорость детали находится в пределах 40...80 м/мин;

5) подобрать охлаждающую жидкость;

6) определить силы резания и мощность, необходимые для обеспечения процесса шлифования. Мощность (в киловаттах), необходимая для вращения круга, $N_k \geq P_z v_k / (\eta \cdot 10^3)$, а для вращения детали $N_d \geq P_z v_d / (\eta \cdot 60 \cdot 10^3)$;

7) выбранные режимы шлифования скорректировать по паспорту станка; при нехватке мощности уменьшают v_d или $S_{пр}$, так как они влияют на мощность резания N_k и основное время t_o ;

8) проверить условия бесприжогового шлифования по удельной мощности, приходящейся на 1 мм ширины круга: $N_{уд} = N_k / B$. Она должна быть меньше допустимой удельной мощности, приводимой в справочной литературе;

9) подсчитать машинное время согласно табл. 10.5.

Таблица 10.5

Расчет машинного времени при шлифовании

Вид шлифования	Машинное время
Круглое наружное в центрах с продольной подачей	$t_o = \frac{l}{n_d S_{пр}} \frac{h}{S_n} K_z$ <p>где l — длина шлифования, мм; h — припуск, мм; S_n — подача в направлении снятия припуска (поперечная подача), мм; K_z — коэффициент зачистных ходов, равный для чистового и черного шлифования соответственно 1,25...1,7 и 1,2...1,4</p>
Круглое наружное в центрах с поперечной подачей (врезное)	$t_o = \frac{l}{n_d S_n} K_z = \frac{h}{n_d S_n} K_z$ <p>где S_n — поперечная подача, мм/об; $K_z = 1,4...2,5$</p>

Окончание табл. 10.5

Вид шлифования	Машинное время
Бесцентровое напроход	$t_0 = \frac{lq + B_k}{qS_{np}} iK_3,$ где q — количество деталей в партии, шт., шлифуемых непрерывным потоком; B_k — ширина круга, мм; i — число проходов; $K_3 = 1,05...1,20$
Плоское периферией круга	$t_0 = \frac{L}{1000v_d} \frac{Hh}{S_d^2} K_3;$ $H = B_d + B + 5 \text{ мм}; L = L_d + (10...15) \text{ мм},$ где L — длина продольного хода стола станка, мм; H — перемещение круга в направлении поперечной подачи, мм; B_d — ширина детали, мм; $K_3 = 1,15...1,35$ и $K_3 = 1,25...1,5$ соответственно для черногового и чистового шлифования

Литература

1. *Ипполитов Г.М.* Абразивно-алмазная обработка / Г.М. Ипполитов. М.: Машиностроение, 1969.
2. *Маслов Е.И.* Теория шлифования материалов / Е.И. Маслов. М.: Машиностроение, 1974.
3. Справочник технолога-машиностроителя / Под ред. А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова: В 2 т. М.: Машиностроение, 1986. Т. 2.
4. *Ящерицын П.И.* Взаимодействие абразивного круга с потоком смазочно-охлаждающей жидкости при шлифовании / П.И. Ящерицын, Э.С. Бранкевич, В.И. Туромша // Изв. АН БССР. Сер. физ.-техн. наук. 1981. № 3. С. 38–45.
5. *Ящерицын П.И.* Кавитационные явления при шлифовании / П.И. Ящерицын, Э.С. Бранкевич, В.И. Туромша // Изв. АН БССР. Сер. физ.-техн. наук. 1981. № 4. С. 67–72.
6. *Ящерицын П.И.* Повышение эксплуатационных свойств шлифованных поверхностей / П.И. Ящерицын. Мн.: Наука и техника, 1966.
7. *Ящерицын П.И.* Пути управления тепловым балансом при шлифовании / П.И. Ящерицын, А.К. Цокур, А.И. Драевский // Изв. АН БССР. Сер. физ.-техн. наук. 1976. № 3. С. 61–66.
8. *Ящерицын П.И.* Скоростное внутреннее шлифование / П.И. Ящерицын, И.П. Караям. Мн.: Наука и техника, 1980.

Основные характеристики

11.1. обрабатываемости

Способность металлов поддаваться резанию принято называть *обрабатываемостью*. Понятие «обрабатываемость» охватывает совокупность нескольких технологических свойств материала, характеризующих его влияние на различные стороны процесса резания.

Приведем основные характеристики обрабатываемости [9]:

- силы резания и потребляемая мощность;
- легкость ломания и отвода стружки, определяемая ее деформацией и характером стружкообразования;
- возможность получения обработанных поверхностей с минимальной или заданной шероховатостью, степенью и глубиной наклепа и других характеристик качества поверхностного слоя;
- легкость получения необходимой точности обработки при чистовых и отделочных операциях, определяемой для заданной технологической системы интенсивностью изнашивания инструмента, возникающими при резании силами и их изменением по мере затупления инструмента;
- скорость резания v_T , соответствующая заданному периоду стойкости T при износе инструмента до принятого критерия затупления h_a (например, v_{60} , v_{120} или $v_{h_a=0,4}$);
- оптимальная скорость резания v_o , при которой наблюдается наименьшая интенсивность изнашивания инструмента и наименьший относительный поверхностный износ $h_{o,n}$;
- экономическая скорость резания v_e , при которой достигается наименьшая себестоимость обработки условной детали при заданных стоимости станко-минуты, времени на смену затупившегося инструмента и стоимости его эксплуатации за период стойкости.

Для оценки обрабатываемости можно использовать также другие показатели (рис. 11.1).

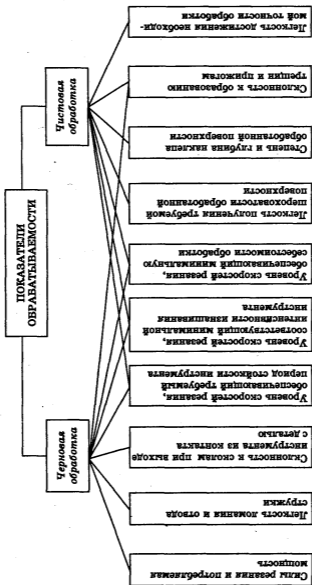


Рис. 11.1. Показатели обрабатываемости

Единой универсальной характеристики обрабатываемости нет. Металл, обладающий хорошей обрабатываемостью с точки зрения уровня целесообразных скоростей, иногда не может обеспечить требуемой шероховатости поверхности; при этом возникают слишком большие силы резания, и наоборот. Кроме того, необходимо учитывать, что оценка обрабатываемости всегда имеет относительный характер. Например, допустимая скорость зависит не только от свойств обрабатываемого материала, но и от качества режущего инструмента. Шероховатость обработанной поверхности тесно связана с геометрическими параметрами инструмента и условиями резания (в частности, со скоростью резания), при изменении которых можно получить самые различные результаты.

Сравнительная оценка обрабатываемости металлов (табл. 11.1) в значительной степени зависит от специфических особенностей процесса резания [17].

Таблица 11.1

Сравнительная оценка обрабатываемости металлов

Черновая обработка	Чистовая обработка	Обработка на автоматах
1. Стойкость	1. Шероховатость обработанной поверхности	1. Характер стружкообразования
2. Затраты энергии	2. Характер стружкообразования	2. Шероховатость обработанной поверхности
3. Характер стружкообразования	3. Стойкость	3. Стойкость
4. Шероховатость обработанной поверхности	4. Затраты энергии	4. Затраты энергии

Примечание. Показатели расположены в порядке убывания значимости.

Обрабатываемость может сильно различаться для таких различных процессов, как точение проходными резцами, зубодолбление, фрезерование, протягивание и т.д. Таким образом, нельзя говорить об обрабатываемости без конкретного указания на то, какая сторона этого комплексного понятия имеется в виду и каковы особенности выполняемой операции.

В нормативно-справочной литературе обрабатываемость оценивается в первую очередь интенсивностью затупления режущих инструментов и уровнем целесообразных скоростей резания v_T . Необходимо, однако, отметить, что скорость резания v_T как характеристика обрабатываемости имеет ряд недостатков: не известен предел допустимого снижения скоростей резания, проводимого в целях повышения периода стойкости; при сравнении режущих свойств раз-

личных инструментальных материалов в зависимости от уровня скорости v_T не всегда можно правильно оценить их относительную износостойкость; скорость v_T зависит от принятого критерия затупления. Эту характеристику невозможно использовать для автоматического регулирования процесса резания, так как разным комбинациям v , S , t будет соответствовать резко различающиеся периоды стойкости.

Основные недостатки v_T имеет и v_* , поскольку она зависит от организационно-технических условий производства, модели станка, конструкции и способа заточки инструмента, разряда рабочего и др. Скорость v_* стабилизируется только для конкретных условий. Более перспективной с этих позиций является оптимальная скорость резания v_o , которая не базируется на абсолютных показателях. К сожалению, подробная систематизация уровней v_o и $h_{o,л}$ для различных обрабатываемых материалов отсутствует. Поэтому в качестве основного показателя обрабатываемости пользуются значением v_T .

Допустимая скорость v_T , или обрабатываемость металла с точки зрения уровня скоростей резания, определяется двумя характеристиками обрабатываемого металла: 1) истирающей способностью*, от которой зависит интенсивность истирания рабочих поверхностей лезвий инструмента сходящей стружкой и обработанной поверхностью изделия; 2) степенью нагрева рабочей части инструмента при снятии стружки, характеризуемой температурой резания Θ . Свойства металла (механические, физические и др.) оказывают влияние на интенсивность затупления инструментов и на значение v_T лишь постольку, поскольку они связаны с двумя указанными особенностями.

11.2. Способы оценки обрабатываемости

Разработаны различные способы оценки обрабатываемости. Условно их можно разделить на три группы (рис. 11.2).

К первой группе относятся способы, основанные на сопоставлении и анализе интенсивности изнашивания режущего инструмента. Прежде всего, это «классический» способ. Он заключается в определении зависимостей $v = f(T)$ для нового и эталонного (э) материалов. Путем измерения износа резца через небольшие промежутки времени, можно, задавшись определенным периодом стойкости T , найти соответствующие ему скорости резания v_T , $v_{Tэ}$ и определить коэффициент обрабатываемости материала: $K_m = v_T/v_{Tэ}$.

* Истирающая способность обрабатываемого материала наиболее часто оценивается по интенсивности уменьшения линейного размера инструмента или образца из инструментального материала в направлении, нормальном к поверхности трения [16]: $h_{ист} = \Delta h/L$, где Δh — линейный износ; L — путь трения.



Рис. 11.2. Способы оценки обрабатываемости и области их применения (штриховая линия означает необходимость контроля на загрузочной позиции технологической системы)

Данный способ наиболее точно и объективно отражает влияние обрабатываемого материала на интенсивность изнашивания инструмента, однако он очень трудоемок и требует большого расхода обрабатываемого материала и инструментов. Поэтому в настоящее время разработаны ускоренные способы определения обрабатываемости. Ряд из них основан на постоянном увеличении скорости резания в пределах рабочего хода. Наиболее распространен способ торцовой обточки: диск, изготовленный из испытуемого материала, обтачивают на токарном станке по торцу от центра к периферии с постоянной частотой вращения (рис. 11.3). При этом скорость резания постоянно возрастает, и при определенной скорости наступает затупление реза.

Параметры уравнения $T = f(v)$ определяют следующим образом. Общеизвестное уравнение $v = C_v / T^{1/\mu}$ легко преобразуется в следующее:

$$Tv^\mu = C_v^\mu. \quad (11.1)$$

При переменной скорости резания, имеющей место при торцовой обточке, используется среднее значение функции v^μ , т.е.

$$Tv_{cp}^\mu = C_v^\mu. \quad (11.2)$$

В пределах изменения скорости резания от v_0 до v_n

$$v_{cp}^\mu = \frac{\int_0^{v_n} v^\mu dv}{v_n - v_0} = \frac{v_n^{\mu+1} - v_0^{\mu+1}}{(\mu+1)(v_n - v_0)},$$

где v_0 , v_n — скорость соответственно начала резания и момента затупления реза.

Время резания при торцовом точении от начального диаметра d_0 до конечного d_n равно

$$T = \frac{L}{nS} = \frac{1000(v_n - v_0)}{2\pi n^2 S}$$

Из уравнения (11.2) следует:

$$\frac{1000(v_n - v_0)}{2\pi n^2 S} \frac{(v_n^{\mu+1} - v_0^{\mu+1})}{(\mu+1)(v_n - v_0)} = C_v$$

Если после преобразований при условии, что $v_0 \leq v_n/2$, т.е. $d_0 \geq d_n/2$, пренебречь величиной $v_0^{\mu+1}$, получим уравнение

$$1000v_n^{\mu+1} \approx 2\pi n^2 S(\mu+1)C_v \quad (11.3)$$

В уравнении (11.3) две неизвестные (μ и C_v), которые можно найти, сделав проточку торца до затушения реза при разной частоте вращения заготовки (n_1 и n_2), сохраняя все остальные условия постоянными. Решив систему уравнений, получим:

$$\mu = \frac{2\lg(n_1/n_2)}{\lg(v_{n_1}/v_{n_2})} \quad (11.4)$$

$$C_v = 1/\mu \sqrt{\frac{1000v_n^{\mu+1}}{2\pi n^2 S(\mu+1)}} \quad (11.5)$$

где μ и C_v — значения постоянных в уравнении $v - T$; v_n — скорость резания, соответствующая моменту затушения реза при частоте вращения (конечная скорость); n — частота вращения детали; S — поперечная подача.

Значение μ может быть получено графически. Если в двойной логарифмической системе координат расположить по оси абсцисс значения радиусов R_n , на которых произошло затушение реза, а по оси ординат — соответствующие частоты вращения n , то линия, проведенная через экспериментальные точки, будет прямой с углом наклона α (рис. 11.4), причем

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\mu+1}{\mu-1} \quad \text{или} \quad \mu = \frac{1 + \operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha - 1}$$

Подставив в уравнение (11.1) значения, полученные из уравнений (11.4) и (11.5), можно определить скорость резания для данного сечения стружки, соответствующую заданной стойкости инструмента:

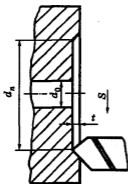


Рис. 11.3. Схема торцевой обточки

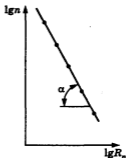


Рис. 11.4. График обработки результатов эксперимента при торцевой обточке

$$v_T = \frac{C_v}{T^{1/\mu}} = 1/\mu \sqrt{\frac{1000v_n^{\mu+1}}{2\pi n^2 S(\mu+1)T}} = v_n^{1/\mu} \sqrt{\frac{D_n}{2nS(\mu+1)T}}, \quad (11.6)$$

где D_n — диаметр заготовки, на котором затупился резец.

Близкими к торцевой обточке являются продольное точение заготовок ступенчатой формы, заготовок конической формы и точение цилиндрических заготовок при бесступенчатом монотонном возрастании частоты вращения шпинделя [36, 37]. В последнем случае формула (11.6) преобразуется к следующему виду:

$$v_T = v_{\max}^{m+1} \left(\frac{m}{(m+1)Tq} \right)^m,$$

где v_{\max} — максимальная скорость резания, при которой достигнут заданный износ; $m = 1/\mu$; q — ускорение, м/мин².

К рассматриваемой группе относится также способ, предложенный в работе [2]. Он основан на том, что интенсивность изнашивания резца в период нормального изнашивания практически не зависит от размеров площадки износа. Суть метода заключается в том, что заготовку из исследуемого материала обтачивают при постоянных подаче и глубине резания одним резцом с различными скоростями резания. Для каждого значения скорости v_1, v_2, \dots, v_n определяют прирост линейного износа задней поверхности резца

$\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n$, соответствующий длительности работы реза $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$, после чего определяют интенсивность изнашивания: $I_1 = \Delta_1/\tau_1$; $I_2 = \Delta_2/\tau_2, \dots, I_n = \Delta_n/\tau_n$. Затем в двойной логарифмической сетке координат строят зависимость $I = f(v)$, представляющую собой прямую линию (рис. 11.5), тангенс угла наклона которой к оси I равен показателю относительной стойкости m в формуле $v = C_v/T^m$.

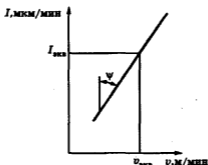


Рис. 11.5. Связь между скоростью резания и интенсивностью изнашивания

Далее определяют эквивалентную за весь период времени работы реза интенсивность изнашивания:

$$I_{\text{экр}} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i}{\sum_{i=1}^n \tau_i}$$

и по графику $I = f(v)$ находят скорость резания $v_{\text{экр}}$, соответствующую $I_{\text{экр}}$. Тогда

$$C_v = v_{\text{экр}} \left(\sum_{i=1}^n \tau_i \right) \operatorname{tg} \psi.$$

Положение о постоянстве интенсивности изнашивания на участке равномерного изнашивания лежит в основе способа, предложенного в [8]. Он заключается в построении кривых износа только на начальном участке с последующей их экстраполяцией до значения $h_{n, \text{кр}}$ (рис. 11.6).

Во второй группе способов оценки обрабатываемости (см. рис. 11.2) физическими параметрами процесса резания явля-

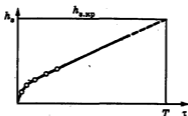


Рис. 11.6. Экстраполяция кривой изнашивания

ются силы резания, угол сдвига, угол трения, усадка стружки, уровень температур в зоне резания (или термоЭДС) и др.

При анализе сил резания можно рассматривать как их абсолютные величины, так и относительные изменения. Например, в одном из способов сравнивается время внедрения сверла на определенную глубину при обработке исследуемого и эталонного материалов. Считают, что оптимальная скорость резания соответствует силе резания $P_{v_0} = (0,7 \dots 0,9) P_{z \max}$ на правой ветви кривой $P_z = f(v)$, причем в этом диапазоне определяющим фактором является отсутствие следов нароста на прирезцовых поверхностях стружки и наливов на передней поверхности инструмента [22]. Удельные силы резания могут использоваться для определения угла сдвига [28]:

$$\operatorname{ctg} \Phi = \frac{Ca^x(1+x)}{\tau_0 - K}$$

где C, K — константы; a — толщина среза; x — показатель степени при толщине среза в формуле для расчета удельной силы резания; τ_0 — критическое напряжение сдвига обрабатываемого материала.

Известно, что при больших углах сдвига облегчается стружкообразование, что опосредствованно характеризует изменения обрабатываемости материала.

По термоЭДС оценивается обрабатываемость при использовании известного способа двух резцов. Резание заготовки 3 (рис. 11.7) производится одновременно двумя резцами 2 из различных инструментальных материалов, например из быстрорежущей стали и твердого сплава. Геометрия заточки резцов и режим резания одинаковы. Поэтому можно считать, что на режущих кромках каждого резца возникает практически одинаковая температура резания. Но так как резцы изготовлены из разных материалов, их можно рассматривать как элементы термодпары, и включенный между ними гальванометр 1 будет показывать ЭДС, которая тем больше,

чем выше Θ . Здесь обрабатываемый материал служит только электрическим проводником и на показания гальванометра не влияет. Если такое устройство один раз протарировать, можно оценивать температуру резания при обработке различных металлов. Абсолютная точность показаний здесь не очень велика, так как температуры Θ на резах будут различаться из-за разной их теплопроводности и разных сил резания. Поэтому такое устройство используется в основном для относительной оценки температур Θ и сравнения их при обработке различных металлов.

Уровень оптимальных скоростей резания можно определить по длине участка упрочнения передней поверхности инструмента, которая достаточно полно характеризует деформационное состояние металла на площадке контакта. В зоне оптимальных скоростей резания существует экстремум на кривой зависимости длины участка упрочнения C от скорости резания (рис. 11.8). В точке экстремума активизируется контактное течение металла, увеличивается толщина контактной зоны, снижается градиент скорости перемещения металла в этой зоне. Зависимость $C = f(v)$ легко построить по результатам кратковременного резания обрабатываемого материала в выбранном с учетом предварительной информации диапазоне скоростей резания [24].

Перспективным направлением является определение обрабатываемости материала с использованием одновременно способов первой и второй групп. Первая группа, как отмечалось, основана на оценке интенсивности изнашивания при различных скоростях резания. В итоге коэффициент обрабатываемости нового материала

$$K_M = v_T / v_{T_0},$$

где v_T и v_{T_0} рассматривают соответственно для нового и эталонного материалов.

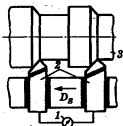


Рис. 11.7. Схема способа двух резов

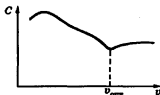


Рис. 11.8. Зависимость длины участка упрочнения передней поверхности инструмента от скорости резания

Единичные показатели обрабатываемости, которые рассматриваются во второй группе способов (силы резания, шероховатость обработанной поверхности), в значительной степени зависят от подачи. Они характеризуют обрабатываемость материала с точки зрения особенностей стружкообразования и формирования поверхностного слоя. Объединив две эти группы, можно найти комплексный коэффициент обрабатываемости:

$$K_m = \frac{v_T}{v_{T_2}} \left(\frac{F_2}{F} \right)^{\frac{1-y_v}{y_n}}, \quad (11.7)$$

или, учитывая одновременно несколько единичных показателей,

$$K_m = \prod \left[\frac{v_T}{v_{T_2}} \left(\frac{F_{i2}}{F_i} \right)^{\frac{1-y_{v_i}}{y_{n_i}}} \right], \quad (11.8)$$

где v_{T_2} , v_T — скорости резания, обеспечивающие заданную стойкость соответственно для эталонного и исследуемого материалов; F_{i2} , F_i — единичные показатели обрабатываемости соответственно эталонного и исследуемого материалов; y_v , y_{F_i} — показатели степени, учитывающие соответственно интенсивность влияния подачи на v_T и i -й единичный показатель обрабатываемости.

После проведения сравнительных стойкостных испытаний при обработке исследуемого и эталонного материалов, а также определения для этих материалов зависимостей типа $Ra = C_{Ra} S^{y_{Ra}}$ или $P_2 = C_P S^{y_P}$ по формулам (11.7), (11.8) можно определить показатели обрабатываемости. Формула (11.7) дает возможность учитывать влияние сил резания (для черновой обработки) или возможность обеспечения требуемой шероховатости обработанной поверхности (при чистовой обработке). Формула (11.8) позволяет найти средневзвешенное значение коэффициента обрабатываемости.

Использование сведений о физических и механических свойствах материалов в третьей группе способов оценки обрабатываемости (см. рис. 11.2) — перспективное направление. Преимуществом таких способов является существенное снижение трудоемкости и расхода обрабатываемого материала, а в качестве анализируемых параметров используются температуры максимального электросопротивления, структурно-фазового превращения α -железа в γ -железо, магнитная проницаемость, коэрцитивная сила, коэффициент внутреннего трения, сопротивление внедрению инденторов и др.

В качестве примера рассмотрим вариант использования температуры максимального электросопротивления [23]. В этом случае

она определяется по результатам стандартных кратковременных испытаний образцов в виде проволоки из обрабатываемого материала. Образцы нагревают до определенной температуры, регистрируют их электросопротивление для данных условий и находят его максимальное значение, т.е. температуру максимального электросопротивления Θ_c . Затем с помощью кратковременных испытаний находят зависимость $\Theta = f(v)$ и скорость резания, соответствующую температуре Θ_c . В [23] показано, что в условиях, когда температура в зоне резания равна Θ_c , интенсивность изнашивания инструмента будет наименьшая. Это дает возможность определения скорости резания, при которой путь резания будет наибольшим (рис. 11.9).

Аналогичным образом оценивают обрабатываемость по изменению магнитных свойств [27]. По графикам зависимости $T = f(v)$, построенным для заготовок из одной и той же марки стали, но с различными градиентами остаточного магнитного поля ΔH_r , находят значения v_T^1, v_T^2, v_T^3 (рис. 11.10). Затем строят график зависимости $v_T = C/\Delta H_r$, по которой в дальнейшем можно определять v_T для любой заготовки, подвергаемой действию импульсного магнитного поля для нахождения ΔH_r .

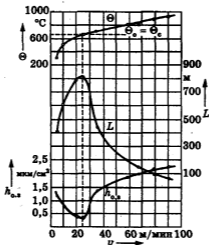


Рис. 11.9. Определение оптимальной скорости резания по температуре максимального электросопротивления при точении сплава ЭИ929ВД резцами из ВК8-ОМ (Θ — температура резания; Θ_0 — оптимальная температура; Θ_c — температура максимального электросопротивления; L — путь резания; $h_{0,2}$ — интенсивность изнашивания задней поверхности резца)

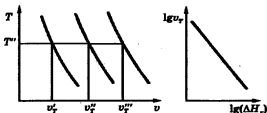


Рис. 11.10. Определение оптимальной скорости резания по изменению градиента остаточного магнитного поля

Все рассмотренные способы определения обрабатываемости можно эффективно использовать в лабораторных условиях. На производстве первая группа способов (см. рис. 11.2) практически неприменима из-за сложности определения интенсивности изнашивания и тем более расчетов. Поэтому обрабатываемость различных материалов оценивают по соотношениям периодов стойкости (при условиях равенства скоростей резания). Способы второй и третьей групп вполне приемлемы при работе на оборудовании гибких автоматизированных производств. В гл. 7 рассматривались физические принципы адаптивного управления и контроля состояния режущего инструмента. Если в память системы ЧПУ или блока сравнения заложить сведения об эталонном показателе обрабатываемости, то по результатам обработки конкретной детали будет изменяться режим резания. При использовании способов третьей группы необходим входной контроль на загрузочной позиции.

11.3. Способы улучшения обрабатываемости

Подбор оптимальных составов технологической среды. Ранее (см. гл. 9) отмечалось, что технологическая среда снижает температуру в зоне резания, трение на площадках контакта, охрупчивает металл в зоне пластической деформации и т.д. Правильно подобрав состав технологической среды, можно резко снизить интенсивность изнашивания и улучшить качество обработанной поверхности. Рекомендации по выбору СОТС в зависимости от обрабатываемого материала и условий обработки приведены ниже (§ 11.4–11.7).

Подвод в зону резания дополнительной энергии. Этот способ широко применяется при резании труднообрабатываемых материалов. В частности, производится их обработка в нагретом состоянии,

с наложением электрических и магнитных полей, принудительных колебаний определенной частоты и т.д. Вследствие этого изменяется интенсивность изнашивания режущих кромок и период стойкости возрастает в несколько раз [11, 14].

Регулирование микроструктуры за счет подбора режимов термической обработки. Для каждой группы материалов можно подобрать такой режим термообработки, который обеспечивает получение определенных микроструктуры и уровня механических свойств. Так, например, стали для хорошей обрабатываемости должны иметь следующую микроструктуру:

□ малоуглеродистые ($C < 0,3\%$) — пластинчатый перлит и феррит, резко выраженная строчечность феррита и крупные скопления его ухудшают обрабатываемость;

□ со средним содержанием углерода ($C = 0,35...0,55\%$) — пластинчатый перлит и феррит в виде сетки или не крупных зерен;

□ высокоуглеродистые конструкционные ($C > 0,55\%$) и инструментальные стали — зернистый перлит.

Соответствующим образом подбираются виды термообработки (нормализация, отжиг) и их режимы [17].

Обрабатываемость чугуна можно улучшить графитизирующим или сфероидизирующим отжигом, исключая появление сетки карбидов и обеспечивающим округлую форму зерен.

Термообработка труднообрабатываемых материалов определяет фазовый состав, процентное содержание фаз, их дисперсность и распределение, а также размеры зерен твердого раствора. При этом требуется выдерживать на определенном уровне число упрочняющих избыточных фаз, поскольку от них зависят и обрабатываемость, и жаропрочность материала. Для термообработки рекомендуется использовать двойную закалку с последующим высокотемпературным старением.

Введение в состав обрабатываемого материала специальных присадок. Известны два механизма действия присадок, способствующих улучшению обрабатываемости. В первом случае снижается коэффициент трения на контактных площадках и интенсивность изнашивания, поскольку присадки образуют в металле твердые смазочные вещества (сульфиды, селениды, сульфоселениды и др.). Во втором случае присадки, являясь концентраторами напряжений, способствуют охрупчиванию обрабатываемого материала, снижают силы резания и уровень температур.

Наиболее характерными присадками являются элементы, относящиеся к VI группе периодической таблицы Д.И. Менделеева — сера, селен, теллур, которые образуют в стали неметаллические

включения, а также свинец. Примером сталей повышенной обрабатываемости могут служить автоматные стали с повышенным содержанием серы (A11...A35), серы и фосфора (A12), серы и свинца (AC14). Свинец в последнем случае присутствует в стали в двух модификациях: в виде мелких обособленных частиц, произвольно расположенных в матрице металла, и в виде комплексных соединений $MnS - Pb$. Свинец характеризуется низкой температурой плавления, поэтому кроме охрупчивающего действия он может создать на площадках контакта жидкую пленку. Установлено, что для резкого снижения склонности к схватыванию достаточно образования пленки толщиной около 2 мкм [21].

На состав, форму, размеры и распределение избыточных фаз существенным образом влияет такой этап выплавки стали, как раскис-

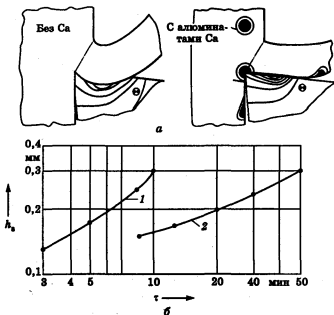


Рис. 11.11. Изменения условий резания при обработке кальциевых сталей [30]:

a — схема образования смазочных пленок и изменение распределения температур в зоне резания; *б* — кривые износа резцов из твердого сплава HC-P15 с покрытием $Ti(C,N)/Al_2O_3/TiN$ при точении стали 38MnSiV5 в исходном состоянии (кривая 1) и после раскисления кальцием (кривая 2)

ление, для чего используются кремний, алюминий, марганец и кальций. Кальций позволяет значительно улучшить обрабатываемость сталей. В их структуру входят силикаты или алюминаты кальция в сульфидной оболочке, образующие на поверхностях контакта обрабатываемого материала с режущим лезвием смазочные пленки. Это резко снижает коэффициенты трения на площадках контакта, силы и температуру резания, интенсивность изнашивания инструмента (рис. 11.11). Такие стали успешно применяются в автомобилестроении (АЦ20ХГНМ вместо 20ХГМ, АЦ40Х вместо 40Х и др.), обеспечивая повышение периода стойкости до 3 раз [19].

Обрабатываемость сталей, чугунов,

11.4. цветных металлов и сплавов

11.4.1. Обрабатываемость конструкционных и инструментальных сталей

Обрабатываемость сталей следует рассматривать с точки зрения их истирающей способности и уровня температур резания. Химический состав, механические свойства, микроструктура и другие факторы влияют на $k_{\text{мет}}$ и Θ .

Рассмотрим роль основных химических элементов в обрабатываемости конструкционных и инструментальных сталей [4].

При обработке материалов с весьма малым содержанием углерода (сталь 08, армо-железо) трудно обеспечить высокое качество обработанной поверхности. Оптимальным с точки зрения периода стойкости инструмента считают содержание углерода 0,10...0,20 %. При его повышении до 0,20...0,30 % и более наблюдается заметное снижение стойкости, обусловленное появлением в микроструктуре абразивных частиц цементита. Улучшить обрабатываемость можно путем изменения микроструктуры (см. § 11.3). В легированных сталях влияние углерода более сложное, поскольку связано с образованием карбидов различного состава, их размерами, твердостью и т.д.

Наличие в стали марганца упрочняет феррит, снижает пластичность стали. При сочетаниях $C < 0,20 \%$ и $Mn < 1,5 \%$ процесс резания заметно улучшается. При высоком содержании марганца (свыше 10 %) сталь приобретает склонность к наклепу под действием сил резания, вследствие чего резко возрастает прочность, снижается пластичность поверхностного слоя детали, по границам зерен

образуются железомарганцовистые карбиды, а аустенит частично переходит в мартенсит. Обрабатываемость в этом случае чрезвычайно низкая. Повысить ее можно при нагреве заготовок до температуры 400...600 °С, когда снимаются вредные последствия наклепа. При наличии в стали некоторого количества серы в ней образуются сульфиды марганца, играющие роль граничной смазки на поверхностях трения.

Фосфор, сера, свинец используются как присадки, улучшающие обрабатываемость (см. § 11.3).

Содержание кремния во всех случаях ухудшает обрабатываемость сталей вследствие образования силикатных абразивных включений.

Наличие молибдена, ванадия, хрома, вольфрама повышает прочность и вязкость сталей, ухудшая их обрабатываемость. Эти элементы образуют твердые растворы с железом и карбиды различного состава и твердости. Как следствие, возрастает истирающая способность материала. Хром, способствуя коагуляции карбидных частиц при отпуске, значительно снижает теплопроводность материала. Кобальт, наоборот, замедляет коагуляцию карбидов, повышая теплопроводность. Он несколько снижает прочность и вязкость стали, образуя твердый раствор с железом. Присутствие никеля в твердом растворе способствует его упрочнению, однако снижает обрабатываемость сталей.

Таким образом, обрабатываемость сталей ухудшается с увеличением содержания углерода и легирующих элементов, поскольку в этом случае увеличиваются $k_{\text{ист}}$ и Θ . В настоящее время принята классификация сталей по обрабатываемости резанием, приведенная в табл. 11.2 (коэффициент K_M характеризует снижение уровня скоростей резания v_T).

Таблица 11.2

Коэффициенты обрабатываемости сталей и чугунов

Материал	Марка	K_M^*
Сталь конструкционная автоматная, ГОСТ 1414-75	A11, A12, A20, A30, A35	1,2/-
Сталь углеродистая качественная, ГОСТ 1050-74	08, 10, 15, 20...65, 65Г, 70Г	1,0/0,85
Сталь конструкционная легированная, ГОСТ 4543-71:		
марганцовистая	15Г...70Г, 10Г2...50Г2	1,0/0,85
хромистая	15Х, 15ХА, 20Х...50Х	1,0/0,85
хромоникелевая	20ХН, 40ХН, 50ХН, 12ХН2, 20ХН3А, 30ХН3А, 12Х2Н4А	0,9/0,8

Окончание табл. 11.2

Материал	Марка	K_m^*
хромомарганцовистая	18ХГ, 18ХГТ, 30ХГТ, 20ХГР	0,8/-
хромокремнистая	30ХС, 38ХС, 40ХС	-/0,8
хромованадиевая	15ХФ, 40ХФА	1,0/0,85
хромомолибденовая	15ХМ...38ХМ, 35Х2МА	0,8/-
хромоалюминиевая	38ХЮ, 35ХЮА, 38Х2Ю	0,8/-
хромокремнемарганцовистая и хромокремнемарганцовоникелевая	20ХГС, 30ХГС, 35ХГСА, 38ХГСА, 30ХГСН2А...	1,15/0,85
хромоникелемолибденовая	14Х2Н3МА, 20ХН2М, 38Х2Н2МА, 25Х2Н4МА...	1,15/0,85
хромоникелевольфрамовая	25ХНВА, 30ХНВА	0,8/0,8
хромоникелеванадиевая	20ХНФ, 30ХНВФА	0,8/0,8
хромомолибденованадиевая	35ХМФА, 30Х3МФ	0,8/0,8
хромомолибденоалюминиевая	38ХМЮА	0,8/0,8
Сталь инструментальная углеродистая, ГОСТ 1435-74	У7А...У13А	1,0/-
Сталь инструментальная легированная, ГОСТ 5950-73	ХВ5, ХВГ, ХВСГ, 9ХС, ХГС, 6ХВ2С, ХГСВФ...	-/0,85
Сталь шарикоподшипниковая, ГОСТ 801-60	ШХ9, ШХ15, ШХ15СГ	-/0,7
Сталь инструментальная быстрорежущая, ГОСТ 19265-73	Р9, Р18, Р18К5Ф2, Р6М5, Р9К5...	-/0,85
Чугун серый, ГОСТ 1412-85	СЧ10...СЧ35	1,0/0,9
Чугун ковкий, ГОСТ 1215-79, и чугун высокопрочный, ГОСТ 7293-85	КЧ30-6...КЧ35-10... ВЧ38-17...ВЧ60-2	0,9/0,7

*В числителе приведены коэффициенты для HB 179...229, в знаменателе — для HB 229...269.

В производственных условиях важно увязывать обрабатываемость материалов с их прочностью и твердостью. В общем случае существует связь между v_T и механическими свойствами металлов. Однако никакое из механических свойств не оказывает самостоятельного влияния на относительный уровень скорости резания, поскольку интенсивность изнашивания режущих инструментов не зависит непосредственно от временного сопротивления, твердости, относительного удлинения и т.д. Каждому из этих механических свойств присущ вполне определенный физический смысл, который не дает оснований связывать их со стойкостью инструмента. Связь между этими свойствами и v_T существует лишь постольку, поскольку они связаны с основными факторами, обуславливающими

интенсивность изнашивания режущих инструментов, а именно: истирающей способностью обрабатываемого материала и температурой резания, возникающей при снятии стружки. В частности, увеличение прочности и твердости уменьшает скорость v_T , поскольку такому изменению механических свойств сопутствует увеличение истирающей способности и температуры резания. Увеличение вязкости и пластичности обрабатываемого материала снижает истирающую способность, что позволяет повысить скорость v_T .

В практике часто пользуются следующими приблизительными зависимостями между v_T и механическими свойствами металлов:

$$v_T = \frac{C_{\text{НВ}}}{\text{НВ}^{n_p}} \quad \text{или} \quad v_T = \frac{C_{\sigma_s}}{\sigma_s^{n_p}},$$

где n_p — показатель интенсивности влияния НВ и временного сопротивления σ_s на v_T .

Для оценки этого показателя при обработке различных материалов приведем следующие данные. При точении быстрорежущими резцами незакаленных сталей $n_p = 1,50 \dots 1,75$, твердосплавными резцами закаленных и незакаленных сталей — соответственно $1,0 \dots 1,5$ и $1,5 \dots 2,0$. Зная v_T' при обработке определенного материала твердостью НВ', а также НВ" материала другой марки, можно легко определить допустимую скорость резания v_T'' для его обработки: $v_T'' = v_T'(\text{НВ}'/\text{НВ}'')^{n_p}$.

Пример 11.1. При точении стали 40Х твердостью НВ 207 $v_T' = 30$ м/мин. Требуется определить v_T'' , если необходимо обрабатывать сталь твердостью НВ 255.

Если $n_p = 1,75$, то $v_T'' = 30(207/255)^{1,75} = 20$ м/мин.

Наряду с химическим составом на истирающую способность материала влияет его микроструктура [17]. Наименьшей истирающей способностью обладает феррит; небольшой коэффициент $k_{\text{ист}}$ имеет аустенит; истирающая способность перлита зависит от формы цементита; у пластинчатого перлита она больше, чем у зернистого, у зернистого — тем меньше, чем меньше зерна цементита; у высоколегированных сталей истирающая способность значительно увеличивается, если карбиды расположены в виде скоплений или сетки.

Наибольшая скорость v_T достигается при резании феррита. Интенсивность изнашивания возрастает при резании материалов со структурами зернистого и пластинчатого перлита, сорбита, троостита.

Однако в тех или иных технологических ситуациях используют различные показатели обрабатываемости (табл. 11.3).

Таблица 11.3

Влияние микроструктуры стали на показатели обрабатываемости

Показатель обрабатываемости	Микроструктура стали						
	Зернистый перлит	Пластинчатый перлит	Феррит в виде строчек или крупных зерен	Мелкозернистый перлит при отпуске с большим содержанием феррита	Сорбитообразный перлит	Карбиды в виде скопленных или сетчатых осадков	Сорбит с высокой твердостью
Период стойкости быстрорежущих и твердосплавных инструментов при черновой обработке	Самый высокий	Удовлетворительный	Удовлетворительный	Удовлетворительный	Удовлетворительный	Низкий	Очень низкий
Период стойкости быстрорежущих инструментов при протягивании, развертывании, зубонарезании	Низкий*	Высокий*	Низкий	Низкий	Удовлетворительный	Низкий	Очень низкий
Шероховатость поверхности при протягивании, развертывании, зубонарезании с низкими скоростями резания	Плохая	Хорошая	Плохая	Плохая	Хорошая	Удовлетворительная	Очень хорошая

Шероховатость поверхности при работе с высокими скоростями резания (более 70 м/мин)	Очень хорошая	Удовлетворительная или хорошая	Удовлетворительная	Хорошая	Удовлетворительная	Очень хорошая	Очень хорошая
Силы резания и склонность к вибрациям	Большие	Небольшие	Повышенные	Небольшие	Небольшие	Большие	Большие
Заусенцы после обработки	Большие	Небольшие	Большие	Небольшие	Небольшие	Небольшие	Небольшие
Отвод стружки при обработке на токарных станках	Затрудненный	Хороший	Затрудненный	Хороший	Хороший	Удовлетворительный	Хороший
Наличие обрабатываемого металла на заданной поверхности инструмента	Значительное*	Незначительное	Значительное	Значительное	Очень значительное	Значительное	Отсутствует

* Для среднеуглеродистых сталей.

При обработке деталей на автоматизированном оборудовании серьезное внимание уделяется благоприятному стружкообразованию и обеспечению требуемой шероховатости обработанной поверхности. Решающее влияние на последнюю оказывает микроструктура: если она состоит из зернистого перлита, сорбита и троостосорбита, то зона максимальных микронеровностей смещается в зону меньших скоростей по сравнению с обработкой пластинчатого перлита; высота микронеровностей тем больше, чем больше содержание в структуре сталей свободного феррита; повышение содержания углерода и легирующих элементов способствует уменьшению шероховатости, что происходит также по мере увеличения размера зерна перлита. Значительная высота микронеровностей наблюдается при мелком зерне перлита и высоком содержании свободного феррита, а наилучшая — при структурах троостосорбита и сорбита с высокой твердостью. Оценить влияние структуры на шероховатость с учетом характера обработки и группы сталей можно по табл. 11.4.

Таблица 11.4

**Шероховатость обработанной поверхности при резании сталей
с различной структурой**

Группа сталей	Компоненты структуры	Обрабатываемость сталей		
		при протягивании, развертывании, нарезании резьбы	при нарезании зубьев, фасонном точении	при чистовом точении, чистовом фрезеровании
Малоуглеродистые	Феррит и пластинчатый перлит	Плохая	Очень плохая или плохая	Удовлетворительная или хорошая
	Сорбитообразный перлит и феррит (после закалки)	Хорошая	Удовлетворительная или плохая	Удовлетворительная или хорошая
Среднеуглеродистые	Пластинчатый перлит и феррит	Хорошая или очень хорошая	Удовлетворительная или хорошая	Удовлетворительная или плохая
	Зернистый или точечный перлит	Плохая или очень плохая	Плохая или удовлетворительная	Очень хорошая или хорошая
	Сорбит с невысокой твердостью	Плохая	То же	То же
	Сорбит с высокой твердостью	Хорошая или очень хорошая	Хорошая	Очень хорошая
Высокоуглеродистые	Пластинчатый перлит	Хорошая или очень хорошая	Удовлетворительная	Удовлетворительная или хорошая
	Зернистый перлит	Плохая или удовлетворительная	Хорошая	Хорошая или очень хорошая

11.4.2. Обрабатываемость чугунов

Обрабатываемость чугунов определяется в первую очередь их микроструктурой, в зависимости от которой они подразделяются на следующие группы:

- 1) ферритные, содержащие феррит и графит;
- 2) перлитные, содержащие перлит и пластинчатый графит;
- 3) перлитные ковкие и сверхпрочные, содержащие перлит и сфероидальный графит;
- 4) половинчатые, содержащие перлит, графит и цементит;
- 5) белые, содержащие перлит и цементит.

Обрабатываемость чугунов ухудшается по мере того, как углерод из свободного состояния (графит) переходит в связанное (цементит), обладающее повышенной истирающей способностью.

На обрабатываемость чугуна влияют также размер и форма частиц графита и цементита. Наилучшая обрабатываемость достигается при наличии небольших сфероидальных зерен графита. При одинаковой твердости уровень v_T для чугунов с пластинчатым графитом всегда меньше. Сетка цементита или крупные его скопления резко снижают обрабатываемость чугунов. Это характерно также для обработки по корке, с окалиной или песком.

Зависимость v_T от НВ для серого чугуна более достоверна, чем для стали, а $n_p = 1,7$.

Вследствие малых пластичности и склонности чугуна к упрочнению силы при его резании меньше, чем при обработке литых сталей на ферритной основе. Уменьшаются ширина площадки контакта на передней поверхности, размеры нароста, а заторможенный слой становится неустойчивым. Из-за малой ширины площадки контакта нормальные напряжения достаточно велики и концентрируются вблизи главной режущей кромки инструмента, способствуя ее сколам. Температура резания при обработке чугунов с пластинчатым графитом ниже, чем при обработке ферритных сталей той же твердости. Однако скорость v_T при обработке чугунов ниже (см. табл. 11.2). Вероятно, в этом случае сказывается преобладающее влияние истирающей способности материала и слабое защитное действие нароста и заторможенного слоя на передней поверхности инструмента.

В машиностроении широко используются легированные чугуны различного назначения. Рассмотрим влияние на обрабатываемость основных легирующих элементов [4].

При небольшом содержании m а р г а н ц а в чугуне период стойкости инструмента не изменяется, а при его содержании свыше 1,5 % — уменьшается.

Содержание кремния до 2,75 % улучшает обрабатываемость чугуна благодаря графитизирующему действию, содержание свыше 3 % приводит к упрочнению феррита, образованию силикатных соединений и снижению v_T .

Наличие никеля до 2 % и меди также способствует графитизации чугуна и улучшает его обрабатываемость. Цирконий и титан при добавке их до 0,4 % активно раскисляют металл и повышают v_T .

Молибден, особенно при содержании его свыше 0,5 %, упрочняет основу чугуна и ухудшает его обрабатываемость. Так же действуют добавки хрома и ванадия. Кроме того, они заметно активизируют образование карбидов. Чугуны с такими добавками отличаются высокой твердостью и прочностью. Обрабатываемость чугуна ухудшается в зависимости от формы карбидной фазы: мелкоугольчатые карбиды → длинноугольчатые карбиды → столбчатые карбиды → разорванная сетка карбидов → сплошная сетка карбидов.

11.4.3. Обрабатываемость алюминиевых сплавов

Алюминиевые сплавы с точки зрения обрабатываемости можно разделить на три группы. К первой относятся сплавы низкой твердости, имеющие склонность к налипанию на инструмент, например дюралюминий в отожженном состоянии. Сплавы второй группы имеют более высокую твердость, не налипают на инструмент. К этой группе относятся термически упрочненный дюралюминий, а также кованные сплавы АМ5, АМг10 и др. В третью группу входят широко распространенные литые сплавы, содержащие кремний, в частности силумины различных марок. Для сплавов первых двух групп наиболее характерно образование сливной стружки в виде длинных лент или спиралей, для сплавов третьей группы — то, что стружка легко дробится на короткие элементы.

По сравнению со сталью алюминиевые сплавы обладают меньшей твердостью, более низким временным сопротивлением и лучшей теплопроводностью, что позволяет значительно повышать скорость резания и подачу. Однако выбор оптимальных условий обработки затруднен из-за совместного действия многих факторов. Высокая вязкость ряда алюминиевых сплавов интенсифицирует налипание частиц на рабочие поверхности режущего инструмента. Это затрудняет стружкоотвод, может вызвать пакетирование стружки в канавках инструмента и образование задиров на обработанной по-

верхности. При нагревании алюминий сильно расширяется (в 2 раза больше, чем сталь). Это препятствует достижению высокой точности обработки, например при развертывании.

Уровень сил резания при обработке алюминиевых сплавов в 2–4 раза ниже, чем при обработке конструкционных сталей. Характер влияния элементов режима резания и переднего угла на силу резания такой же, как при обработке сталей. Алюминиевые сплавы склонны к наростообразованию. Этот процесс протекает чрезвычайно интенсивно в связи с повышенным химическим сродством алюминия к материалам, используемым в качестве инструментальных. Поэтому максимальная высота нароста и его исчезновение отмечаются для алюминиевых сплавов при относительно более низких скоростях резания, чем для сталей.

Между уровнем сил резания и механическими свойствами алюминиевых сплавов нет отчетливой зависимости. Последние оказывают сложное совокупное воздействие на сопротивление металла пластическому деформированию при образовании стружки и на ее трение о переднюю поверхность инструмента. В целом при повышении прочности сплавов уровень сил резания увеличивается. Связь между силами резания и характером микроструктуры алюминиевых сплавов следующая: сила резания выше при обработке сплавов с равномерной структурой, когда содержание твердого раствора кремния в алюминии преобладает над содержанием эвтектики; если частицы эвтектики имеют более грубую пластинчатую форму, силы резания меньше.

Уровень допустимых скоростей резания, обеспечивающих низкую шероховатость обработанной поверхности и нормативные периоды стойкости, при обработке алюминиевых сплавов в несколько раз выше, чем при обработке сталей (табл. 11.5).

Таблица 11.5
Скорости резания при точении алюминиевых сплавов, м/мин*

Группа обрабатываемого материала	Инструментальный материал		
	Быстрорежущие стали	Твердые сплавы	Сверхтвердые материалы
I	200...400	400...1000	200...900
II	100...250	200...400	—
III	60...150	100...300	—

* При чистовой обработке скорость резания можно увеличивать в 2 и более раз.

Обрабатываемость алюминиевых сплавов можно значительно улучшить путем применения оптимальных геометрических и конструктивных параметров инструментов, тщательной доводки их режущих кромок и правильного выбора технологической среды. Необходимо конструктивно обеспечивать свободное размещение стружки в канавках инструмента. Они должны иметь гладкие поверхности с плавными переходами, что уменьшает возможность налипания на них стружки. Для сплавов первой группы рекомендуются передние углы инструмента $25...40^\circ$, второй — $10...25^\circ$, третьей — $10...15^\circ$.

Использование технологических сред наиболее эффективно при чистовой обработке, когда лимитирующим показателем обрабатываемости является шероховатость обработанной поверхности. Как отмечалось, резание алюминиевых сплавов сопровождается интенсивным наростообразованием. Поэтому для снижения шероховатости необходимо работать вне зоны нароста либо применять эффективные СОТС. При жестких требованиях к качеству обработанной поверхности рекомендуется применять масляные СОЖ. В них можно добавлять специальные присадки, способствующие уменьшению трения и массопереносу за счет создания алюминийорганических и высокомолекулярных соединений на площадках контакта.

11.4.4. Обрабатываемость медных сплавов

Медь и ее сплавы находят широкое применение в современном машиностроении в качестве конструкционных, антифрикционных, электротехнических и других материалов.

С точки зрения обрабатываемости медные сплавы можно разбить на следующие группы:

1) сплавы с гомогенной структурой — латуни Л63, бронзы БрОЦ4-3, БрКН1-3, БрА7 и др.; к этой группе относится также медь;

2) сплавы с гетерогенной структурой типа ЛМц58-2, ЛЦ16К4, ЛЦ30А3, ЛЦ23А6Ж3Мц2, БрО10Ф1, БрА9Мц2Л, БрА10Ж3Мц2 и др.;

3) сплавы, которые содержат свинец, — ЛС63-3, ЛЖС58-1-1, БрО4Ц4С17, БрО5Ц5С5 и др.

При обработке сплавов первой группы и красной меди образуется сливная вязкая и трудноломающаяся стружка. Это ухудшает условия работы при использовании автоматизированного оборудования и обработке отверстий (из-за пакетирования стружки в канавках инструмента). Сплавы второй группы также образуют сливную стружку, однако она менее прочная и значительно легче ломается.

При резании свинцовистых сплавов образуется короткая хрупкая стружка, а в случае высокого содержания свинца — стружка надлома почти в виде пыли.

В ряде случаев процесс образования стружки при резании медных сплавов сопровождается ее интенсивным пластическим деформированием. В частности, толщина стружки может превысить толщину среза в 10 и более раз. Коэффициенты K_a , K_f зависят главным образом от структуры сплава. Наибольшие их значения характерны для гомогенных структур, наименьшие — для высокосвинцовистых и гетерогенных сплавов высокой твердости.

При обработке медных сплавов в практически используемом диапазоне скоростей отсутствует нарост, поэтому зависимости $K_f = f(v)$, $P_z = f(v)$ имеют монотонный характер, свойственный материалам, не склонным к наростообразованию. Уровень сил резания зависит от структуры и механических характеристик сплава. Так, при точении гомогенных сплавов и меди сила P_z может быть выше, чем при обработке конструкционных сталей, а для высокосвинцовистых гетерогенных сплавов — уменьшится примерно в 10 раз.

Обрабатываемость медных сплавов определяется температурой в зоне резания и истирающей способностью сплава [4]:

1) присадка к меди любого элемента, образующего с ней твердый раствор (олова, алюминия, кремния), уменьшает v_T в 3–4 раза вследствие резкого снижения теплопроводности материала и увеличения температуры резания в 1,6–2 раза;

2) присадка к медному сплаву никеля, который полностью растворяется в меди и не создает новой фазы, слабо влияет на v_T ;

3) переход от гомогенных структур к гетерогенным приводит к снижению v_T почти вдвое за счет истирающего действия твердых частиц эвтектоида; температура резания при этом изменяется незначительно;

4) создание новых фаз в гетерогенных сплавах практически не влияет на обрабатываемость; исключения составляют добавки свинца, которые за счет уменьшения истирающей способности материала и снижения в 1,4–2 раза температур резания способствуют значительному возрастанию v_T .

Приведенные закономерности позволяют определенным образом расположить медные сплавы по их обрабатываемости (табл. 11.6). При обработке медных сплавов с $K_M = 1$ v_T в 2–3 раза выше, чем при обработке чугунов и сталей. Обрабатываемость медных сплавов резко ухудшается при наличии в них шлаковых включений, а также микротрещин и других дефектов отливки.

Таблица 11.6

Коэффициенты обрабатываемости медных сплавов

Группа сплавов	K_m
Гетерогенные высокой твердости (НВ 150...200)	0,7
Гетерогенные средней твердости (НВ 100...140)	1,0
Гетерогенные свинцовистые	1,7
Гомогенные	2,0
Гомогенные с содержанием свинца, %:	
менее 10	4,0
свыше 15	12,0
Красная медь	8,0

Шероховатость поверхности при обработке медных сплавов не зависит от скорости резания, поскольку физические факторы резания (напряжения, температура, процесс стружкообразования) влияют на формирование поверхностного слоя значительно меньше, чем подача и геометрические факторы (углы в плане, радиус вершины и т.д.).

В качестве технологических сред при обработке меди и ее сплавов рекомендуется использовать масла или жидкости на водной основе. Хорошо зарекомендовали себя среды с присадками на базе серы, хлора, фосфора, являющиеся сильными окислителями [1, 5, 18].

11.5. Особенности резания жаропрочных и коррозионно-стойких сталей и сплавов

В машиностроении применяется свыше тысячи марок сталей со специальными свойствами, из них более 500 нержавеющей и жаропрочных. *Жаропрочными* называются материалы, способные выдерживать механические нагрузки без существенных деформаций и обладающие высоким сопротивлением ползучести, длительной прочностью и жаростойкостью. *Жаростойкость* — способность противостоять химическому разрушению под воздействием воздуха или других агрессивных сред при высоких температурах. *Коррозионно-стойкими (нержавеющими)* называются материалы, обладающие высокой коррозионной стойкостью в агрессивных средах, т.е. в воздухе, парах воды и кислотах.

По физико-механическим свойствам жаропрочные, жаростойкие и нержавеющей стали и сплавы имеют много общего, что обуслови-

вает их технологические качества. В зависимости от химического состава и для обеспечения удовлетворительной обрабатываемости резанием труднообрабатываемые стали и сплавы имеют различную структуру: ферритную, мартенситно-ферритную, аустенитную и аустенитно-мартенситную. В связи с этим стали подразделяются на классы (табл. 11.7). Например, жаропрочные и жаростойкие стали чаще всего относятся к аустенитному классу. Структура таких сталей представляет собой твердый раствор аустенита с границированной кристаллической решеткой. Кроме того, большая часть деформируемых жаропрочных сплавов относится к типу дисперсионно-твердеющих. Высокая дисперсность структуры повышает сопротивление ползучести сплавов и препятствует возникновению и развитию процессов скольжения.

Таблица 11.7

Классификация труднообрабатываемых сталей и сплавов по их обрабатываемости резанием [12]

Номер группы	Краткая характеристика	K_m^*
I	Теплостойкие хромистые, хромоникелевые и хромомолибденовые стали перлитного и мартенситного классов	0,8
II	Коррозионно-стойкие (нержавеющие) хромистые и сложнoleгированные стали ферритного, мартенситно-ферритного и мартенситного классов	0,65
III	Коррозионно-стойкие, кислотостойкие, жаростойкие хромоникелевые стали аустенитного и аустенитно-мартенситного классов	0,5...0,4
IV	Жаропрочные, жаростойкие, кислотостойкие хромоникелемарганцовистые сложнoleгированные стали аустенитного класса	0,3
V	Жаропрочные деформируемые сплавы на железоникелевой и никелевой основе	0,16...0,075
VI	Окалиностойкие и жаропрочные литейные сплавы на никелевой основе	0,04

* По сравнению со сталью 45. Если за эталон принять сталь 12X18H9T (III группа), коэффициент обрабатываемости увеличится вдвое.

Худшая обрабатываемость жаропрочных и нержавеющих сталей и сплавов по сравнению со сталью 45 определяется их физико-механическими характеристиками, химическими свойствами, структурой, теплофизическими показателями. Рассмотрим некоторые свойства жаропрочных и нержавеющих материалов, затрудняющие их механическую обработку [10, 11, 13].

1. Высокое упрочнение материала в процессе его деформирования резанием. Жаропрочные и нержавеющие стали чаще всего относятся к сталям аустенитного класса, имеющим кристаллиты с гранцентрированной кристаллической решеткой. Поэтому сплавы аустенитного класса характеризуются низким пределом текучести при том же временном сопротивлении, т.е. они весьма пластичны. Пластичность определяется отношением условного предела текучести, соответствующего 0,2% -й остаточной деформации, к временному сопротивлению ($\sigma_{0,2}/\sigma_B$). Для жаропрочных сталей это соотношение составляет 0,40...0,45, в то время как для конструкционных сталей оно равно 0,60...0,65 и более. Чем меньше отношение $\sigma_{0,2}/\sigma_B$, тем пластичней материал и тем больше работу и силы резания надо затратить на снятие одного и того же объема такого материала.

Повышенная способность к упрочнению жаропрочных и нержавеющих материалов приводит к тому, что в процессе резания σ_B возрастает примерно в 2 раза, σ_r — в 3–4 раза, а относительное удлинение уменьшается с 40...65 до 5...10 %.

Исследования микротвердости корней стружки показали, что при точении стали X18H10T она примерно в 2 раза больше, чем у недеформированного металла; относительное упрочнение для сплавов IV и V групп составляет 50...60 %, что значительно ниже этих же значений при обработке конструкционных материалов.

2. Жаропрочные и нержавеющие стали и сплавы имеют низкую теплопроводность по сравнению с конструкционными материалами (табл. 11.8). При их обработке выделяется значительное количество теплоты, резко возрастает уровень температур в зоне резания (рис. 11.12). Это способствует активизации адгезионных и диффузионных процессов, интенсифицирует изнашивание рабочих поверхностей инструментов, снижает v_T . Вследствие этого использование твердых сплавов в качестве инструментального материала не всегда возможно, а применение быстрорежущих инструментов оправдано лишь при малых скоростях резания. При увеличении скорости температура резания превышает предел теплостойкости инструментального материала, и инструмент быстро выходит из строя. Повышению производительности обработки указанных материалов и уровня стойкости инструмента способствует применение соответствующе подобранных СОЖ.

3. Способность рассматриваемых материалов сохранять исходную прочность и твердость при повышенных температурах приводит к тому, что в процессе резания инструмент испытывает высокие удельные нагрузки. Так, при нагреве сплава ХН77ТЮ до

температуры 700 °С его временное сопротивление $\sigma_s = 900 \dots 1000$ МПа, а при температуре 800 °С $\sigma_s = 800 \dots 900$ МПа. В свою очередь, при нагреве стали 45 до этих температур σ_s снижается в 3–5 раз. Весьма слабое разупрочнение жаропрочных и нержавеющих материалов при нагреве до высоких температур приводит к тому, что на передней поверхности режущего инструмента действуют высокие удельные нагрузки (до 5000...9000 МПа), соответствующие нагрузкам, возникающим при обработке закаленных конструкционных сталей с 60...64 HRC. Этому обстоятельству способствуют значительно большие по сравнению с конструкционными сталями значения коэффициента трения на контактных площадках, обусловленные интенсивным адгезионным взаимодействием. Высокое химическое средство обрабатываемого и инструментального материалов вызывает их схватывание и даже разрушение контактных площадок. Наибольшую способность к адгезии имеют металлы, обладающие повышенной пластичностью, с атомными диаметрами, различающимися не более чем на 15...18 % (например, железо — хром, железо — медь).

Таблица 11.8

Теплопроводность различных материалов [13]

Материал	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К	Материал	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К
Медь	360	Сплав ХН77ТЮ	19
Сталь 45	40	Сплав ЖС6К	17
Сталь ШХ15	33	Чугун СЧ10	39
Сталь 20Х18	27	Твердый сплав ВК8	55
Сталь 12Х18Н9Т	23	Твердый сплав Т15К6	27

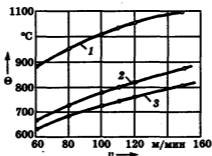


Рис. 11.12. Зависимость температуры от скорости резания при точении:
1 — стали 12Х18Н9Т; 2 — стали 30ХГСА; 3 — стали 45

4. Большая истирающая способность жаропрочных и нержавеющей сталей и сплавов обусловлена наличием в них кроме фазы твердого раствора еще и второй фазы, когда образуются интерметаллидные или карбидные включения. Последние, подобно абразиву, истирают инструмент, вызывая ускоренное изнашивание его кромок. В процессе пластического деформирования жаропрочных и нержавеющей материалов происходит выделение карбидов, твердость которых приближается к твердости твердых сплавов групп ВК и ТК. Вследствие этого резко возрастает истирающая способность жаропрочных сплавов, а еще более — литых на никелевой основе. Им присущи значительный разброс размеров зерен, а также неравномерность выделения карбидов и интерметаллидной фазы после ихковки, прокатки и особенно литья. Наличие таких зон приводит к резкому возрастанию сил резания и температуры, что в значительной степени обуславливает затупление и разрушение режущих кромок инструмента.

При обработке сплавов особые требования предъявляются к прочностным характеристикам и износостойкости режущего инструмента. Рабочие поверхности его лезвий должны быть тщательно доведены и подвергнуты специальной химической обработке с целью образования на них прочных пленок, снижающих коэффициент трения.

5. Пониженная виброустойчивость при резании нержавеющей и жаропрочных материалов обусловлена их высокой упругостью при неравномерной пластической деформации. Возникновение вибраций приводит к микро- и макровыкрашиванию режущих кромок инструментов. Эти явления усиливаются из-за наличия схватывания сходящей стружки с передней поверхностью.

Учитывая рассмотренные особенности, физическую сущность процесса резания нержавеющей и жаропрочных материалов можно свести к следующему [11]. Сначала инструмент врезается в неупрочненный металл, и под его воздействием происходит пластическое деформирование слоя металла, сопровождаемое поглощением прикладываемой извне энергии; срезаемый слой металла при этом упрочняется и становится хрупким. Затем происходит сдвиг и образование элемента стружки. Вследствие малой теплопроводности обрабатываемого материала теплота резания концентрируется в зоне снятия стружки и способствует активизации процессов адгезии и диффузии, вызывая разрушение режущих кромок инструмента. Указанные явления наряду с повышенными абразивными и меха-

Основные особые свойства обрабатываемого материала

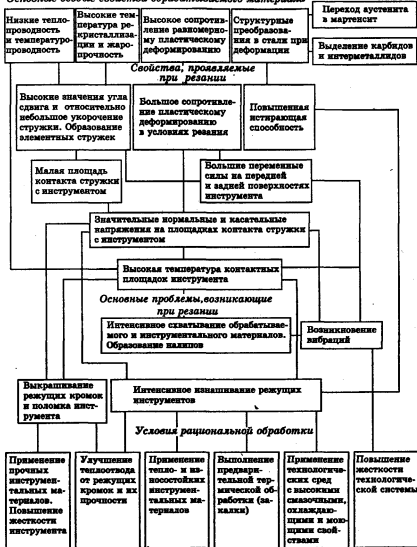


Рис. 11.13. Карта обрабатываемости жаропрочных сталей и сплавов [6]

ническими свойствами нержавеющей и жаропрочных материалов при высокой температуре, а также переменное воздействие этих факторов, обусловленное вибрациями, интенсифицируют процесс изнашивания режущих инструментов.

Указанные особенности жаропрочных и нержавеющей сталей и сплавов резко ухудшают их обрабатываемость резанием по сравнению с обычными конструкционными сталями и чугунами. Скорость резания с повышением жаропрочности труднообрабатываемых сталей и сплавов снижается в 10–20 раз по сравнению с обработкой обычной конструкционной стали 45 (см. табл. 11.7). При этом в 1,5–2,5 раза возрастают силы резания, что является причиной более высоких температур в зоне резания, а также небольших периодов стойкости режущего инструмента.

При повышении уровня легирования рассматриваемых материалов их обрабатываемость резко ухудшается. Если скорость резания при обработке нержавеющей стали 20Х13 твердосплавным и быстрорежущим инструментами не превышает соответственно 150 и 30 м/мин, то скорость резания при обработке сплава ЖС6К на никелевой основе твердосплавным инструментом не больше 10...20 м/мин, а быстрорежущим — 0,5...1 м/мин. Для повышения обрабатываемости жаропрочных сплавов используется предварительная термообработка заготовок — отжиг или отпуск, в результате чего из твердого раствора выделяются вторичные фазы и уменьшается интенсивность упрочнения данных материалов. Весьма эффективно также использование технологических сред.

Согласно данным [1, 15], правильный выбор СОТС может повысить период стойкости инструмента в 1,5–3 раза, снижает высоту микронеровностей до 1,5 раза.

Характер изнашивания инструментов при обработке сталей I–III групп в целом аналогичен изнашиванию при обработке конструкционных сталей, но значительно более интенсивен.

Преобладающим видом изнашивания инструментов при обработке сталей и сплавов IV и V групп является адгезивно-усталостное. В этом случае необходимо применять СОТС с повышенной смазывающей способностью. При обработке сплавов VI группы преобладает абразивное изнашивание и, как следствие, часто применяются более дешевые и гигиеничные водные СОТС.

Для труднообрабатываемых материалов иногда составляют так называемые карты обрабатываемости, по которым легко наметить условия их рациональной обработки (рис. 11.13; см. с. 375).

11.6. Особенности резания титановых сплавов

Титановые сплавы широко используются в современной технике, поскольку их высокие механические свойства и коррозионная стойкость сочетаются с малым удельным весом. Разработаны сплавы различных составов и свойства, например: технически чистый титан (BT1), сплавы систем титан — алюминий (BT5), титан — алюминий — марганец (OT4), титан — алюминий — хром — молибден (BT3) и др. По общей классификации труднообрабатываемых материалов титановые сплавы сведены в VII группу. Коэффициенты их обрабатываемости приведены ниже.

Марка сплава.....	BT1	BT3	OT4	BT5	BT6	BT14	BT15
K_m	0,45	0,18	0,25	0,20	0,20	0,18	0,18

Титановые сплавы так же, как нержавеющие и жаропрочные стали и сплавы, имеют ряд особенностей, обуславливающих их низкую обрабатываемость.

1. Малая пластичность, характеризуемая высоким коэффициентом упрочнения $\sigma_{0,2}/\sigma_n$, примерно в 2 раза большим, чем у жаропрочных материалов [11]. Вместе с тем механические характеристики титановых сплавов (относительное удлинение δ и относительное сужение ψ) по сравнению с жаропрочными меньше. Пониженные пластические свойства титановых сплавов в процессе их деформирования способствуют развитию опережающих микро- и макротрещин. Образующаяся стружка по внешнему виду напоминает сливную, имеет трещины, разделяющие ее на очень слабо деформированные элементы, прочно связанные тонким и сильно деформированным контактным слоем. Образование такой стружки (сегментированной) рассмотрено в гл. 3.

Углы сдвига при резании титановых сплавов достигают 38...44°. В этих условиях при скоростях резания, больших 40 м/мин, возможно образование стружки с коэффициентом укорочения $K_l < 1$ (рис. 11.14), т.е. стружка имеет большую длину, чем путь резания.

Пониженная пластичность приводит к тому, что при обработке титановых сплавов сила P_z примерно на 20 % ниже, чем при обработке сталей, а силы P_y и P_x — выше. Это различие указывает на характерную особенность титановых сплавов: силы резания на задней поверхности при их обработке относительно больше, чем при обработке сталей. Как следствие, при увеличении износа силы резания, особенно P_y , резко возрастают.

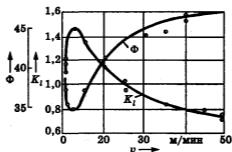


Рис. 11.14. Зависимость угла сдвига и коэффициента укорочения стружки от скорости резания при точении титановых сплавов

2. Высокая химическая активность к кислороду, азоту, водороду. Это вызывает интенсивное охрупчивание поверхностного слоя сплавов вследствие диффузии в него атомов газов при повышении температуры. Насыщенная атмосферными газами стружка теряет пластичность и в этом состоянии не подвергается обычной усадке.

При резании в атмосфере инертных газов (аргона) $K_I > 1$ даже при очень больших (более 300 м/мин) скоростях резания.

Высокая активность титана по отношению к кислороду и азоту воздуха в 2–3 раза снижает площадь контакта стружки с передней поверхностью инструмента, что не наблюдается при обработке конструкционных сталей. Вместе с тем окисление контактного слоя стружки увеличивает ее твердость, контактные напряжения, температуру резания и интенсивность изнашивания инструмента.

3. Чрезвычайно плохая теплопроводность, более низкая, чем у жаропрочных сталей и сплавов. Например, для сплава ВТ10 она равна 11 Вт/(м·К), тогда как для сталей 12Х18Н9Т и 45 — соответственно 23 и 40 Вт/(м·К). Как следствие, при резании титановых сплавов возникает температура, более чем в 2 раза превышающая уровень температур при обработке стали 45 (рис. 11.15).

Высокая температура в зоне резания вызывает интенсивное наростобразование, схватывание обрабатываемого материала с материалом инструмента и появление задигов на обработанной поверхности.

4. Подверженность материалов режущего инструмента абразивному воздействию вследствие содержания в титановых сплавах нитридов и карбидов. Однако при повышении температуры прочность титановых сплавов снижается сильнее, чем нержавеющей сталей и сплавов. Обработка резанием по корке

многих кованных, прессованных, литых заготовок из титановых сплавов затруднена дополнительным абразивным воздействием на режущие кромки инструмента неметаллических включений, оксидов, сульфидов, силикатов и многочисленных пор, образующихся в поверхностном слое. Неоднородность структуры снижает виброустойчивость процесса обработки титановых сплавов. Эти обстоятельства, а также концентрация значительного количества теплоты в пределах небольшой площадки контакта на передней поверхности приводят к преобладанию хрупкого изнашивания с периодическим скалыванием по передней и задней поверхностям и выкрашиванию режущей кромки. При высоких скоростях резания интенсифицируется тепловое изнашивание, на передней поверхности резца развивается лунка. Во всех случаях, однако, лимитирующим является износ задней поверхности.

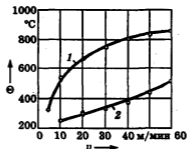


Рис. 11.15. Зависимость температуры от скорости резания при точении:
 1 — титанового сплава резцом из твердого сплава ВК8;
 2 — стали 45 резцом из быстрорежущей стали P18

Уровень скорости резания v_T при обработке титановых сплавов в 2,5–5 раз ниже, чем при обработке стали 45.

5. При обработке титановых сплавов особое внимание необходимо уделять вопросам безопасности обработки, так как образование тонкой стружки и тем более пыли может привести к ее самовоспламенению и интенсивному горению. Кроме того, пылеобразная стружка вредна для здоровья. Поэтому не допускается работа с подачами менее 0,08 мм/об, скоростями резания более 100 м/мин, использование затупленного инструмента с износом более 0,8...1,0 мм, а также скопление стружки в большом объеме (исключение делается для сплава ВТ1, обработка которого разрешается при скоростях резания до 150 м/мин).

При обработке титановых сплавов широко используются технологические среды. Согласно данным [1, 15] правильный выбор СОТС может повысить период стойкости инструмента в 1,5–3 раза, снизить высоту микронеровностей в 1,5–2 раза. Характерная особенность использования СОТС при обработке титановых сплавов — малая эффективность присадок, содержащих серу, азот, фосфор, поскольку эти элементы хорошо растворимы в титане. Гораздо более эффективны в качестве присадок галогены, и в первую очередь йод.

Особенности резания порошковых

11.7. и композиционных материалов и покрытий

В современной технике широко распространены материалы, полученные методами порошковой металлургии. Существует несколько групп таких материалов:

1) конструкционные, изготавливаемые из порошков железа, меди, никеля, хрома, титана и их смесей и соединений с углеродом, кремнием, бором и другими элементами, а также из порошков сталей;

2) материалы для узлов трения, изготавливаемые на основе порошков железа и меди с добавками легирующих элементов и неметаллических веществ, играющих роль твердых смазочных материалов (графит, сульфиды) либо повышающих износостойкость и коэффициент трения (тугоплавкие карбиды, оксиды и др.);

3) материалы электротехнического назначения с большим разнообразием составов;

4) материалы для фильтров на основе порошков железа, бронзы, никеля, хрома, алюминия, нержавеющей стали, тугоплавких соединений;

5) композиционные, изготавливаемые из порошков различных металлов и волокон из никеля, меди, нихрома, углерода, бора и других веществ.

Порошковые материалы имеют ряд специфических особенностей, оказывающих существенное влияние на их обрабатываемость. К ним, в частности, относятся: сложный химический состав; большое количество составляющих микроструктуры, в ряде случаев наличие карбидной сетки, интерметаллидов и других частиц высокой твердости; остаточная пористость, снижающая теплопроводность порошкового материала по сравнению с монолитным на 20 % и более; низкая прочность и малое временное сопротивление (для некоторых материалов).

Процесс резания порошковых материалов отличается от резания монолитных. Образующаяся стружка, будучи сливной, чрезвычайно хрупкая и легко разделяется на элементы. По краям стружки возникает значительное количество трещин, надломов, особенно при высоких скоростях резания. В этом случае при точении материалов с низкой теплопроводностью и малыми сечениями среза наблюдается частичное оплавление стружки. При обработке мягких материалов на железной основе в широком диапазоне скоростей резания возможно наростообразование.

Уровень сил резания зависит от свойств обрабатываемого материала. При точении мягких материалов на железной основе с пористостью свыше 10 % силы резания меньше, чем при обработке конструкционных сталей, а при обработке материалов с ферритной структурой — ниже, чем при обработке чугуна. В этом случае наличие значительного количества пор уменьшает истинное металлическое сечение срезаемого слоя и, следовательно, усилие деформации. Кроме того, в порах могут содержаться антифрикционные включения, например частицы масла, также уменьшающие силы резания. При точении высокотвердых материалов с малой пористостью силы резания, наоборот, несколько больше, чем при точении монолитных. Поры в этом случае служат препятствием образованию микротрещин, снижают растягивающие напряжения у вершины магистральной трещины разрушения и затрудняют отделение стружки. Контактные напряжения при обработке таких материалов выше, чем при обработке монолитных. Указанные обстоятельства, а также пониженная теплопроводность приводят к тому, что температура резания при обработке порошковых материалов превышает температуру при обработке монолитных (рис. 11.16). Исключение составляют материалы, пропитанные маслом.

Износ режущих инструментов в целом аналогичен износу монолитных материалов, однако в ряде случаев возможно микро- и макроразрушение режущих кромок в результате соударения с краями пор. В качестве критериев затупления используются технологические: уровень шероховатости обработанной поверхности, ее отслаивание, появление сколов на торцах детали и т. д. Зависимость $T = f(v)$ имеет сложный характер, обусловленный изменением физических закономерностей изнашивания в том или ином диапазоне скоростей (рис. 11.17). Рекомендации по выбору скоростей резания для различных порошковых материалов приведены в работе [16]. Характер влияния на v_T конкретных условий обработки аналогичен известному для сталей и чугунов.

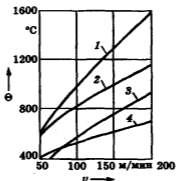


Рис. 11.16. Зависимость температур на передней (кривые 1, 3) и задней (кривые 2, 4) поверхностях реза из композита 10 от скорости резания при точении закаленной монолитной (кривые 3, 4) и порошковой (кривые 1, 2) стали X12

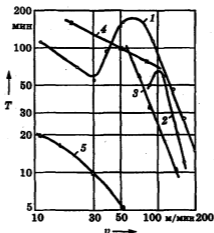


Рис. 11.17. Зависимость стойкости от скорости резания при точении:
 1 — порошкового материала 20X9-П резцом из композита 10;
 2 — ЖГр2 резцом из твердого сплава ВК6; 3 — ЖГр1Д3 резцом из твердого сплава Т15К6; 4 — безвольфрамового твердого сплава КХН-15 резцом из композита 10

В последние годы в машиностроении получают распространение композиционные материалы. К ним относятся материалы с упрочняющими компонентами в виде волокон, монокристаллов и других

частиц такого же либо другого химического состава. В частности, широко используются металлические материалы, упрочненные волокнами или кристаллами SiC либо Al_2O_3 . При их токарной обработке наблюдается следующее:

- интенсивное абразивное изнашивание, стойкость пропорциональна пути резания и практически не зависит от скорости резания;
- на обработанной поверхности образуется слой раздробленных волокон, ускоряющих изнашивание;
- при высоких скоростях резания может образоваться нарост на задней поверхности инструмента [31].

При сверлении композитов на основе силимина весьма положительно зарекомендовали себя сверла с лезвиями из поликристаллических алмазов; их стойкость практически не изменяется в пределах скорости резания 15...300 м/мин и превышает стойкость спиральных твердосплавных сверл до 1500 раз [32].

В практике современного машиностроения широко используются покрытия различного назначения, наносимые на рабочие поверхности деталей машин. Такие покрытия служат для защиты от изнашивания, коррозии, разрушения при высоких температурах, для восстановления размеров изношенных деталей. В ряде случаев наносятся покрытия, обладающие специальными электромагнитными и другими свойствами.

Для покрытий используются: алюминий, вольфрам, кобальт, медь, молибден, никель, титан, хром и др.; никель-хром-бор-кремниевые самофлюсующиеся сплавы типа ПГ-СР, СНГ и др.; никель-алюминиевые сплавы (например, ПН85Ю15); никель-титановые сплавы (например, ПН55Т45); нержавеющей и хромовые стали (ПР-Х18Н9, П2Х13 и др.); железные эвтектические сплавы типа ХВС, ХТН и другие, содержащие до 20 % хрома, а также ванадий, медь, углерод, бор и другие элементы; бронзы; композиционные порошки различного состава; оксиды, карбиды алюминия, хрома, титана и другие материалы.

В качестве наиболее характерных для машиностроения можно выделить две группы покрытий: подвергаемые и не подвергаемые оплавлению. Для покрытий первой группы характерна структура с минимальной пористостью, близкая к структуре монолитных материалов. К ним относятся самофлюсующиеся сплавы, в результате оплавления которых образуется твердый раствор (никель-бор-кремниевые эвтектики, а на поверхности детали — стекловидная пленка на основе оксидов бора и кремния (табл. 11.9). Отличительной особенностью строения покрытий второй группы

является их слоистость: частицы напыляемого материала сильно вытянуты и разделены между собой пленками оксидов. Материал характеризуется пористостью и неоднородностью строения, в нем находятся оксиды, нитриды и другие химические соединения, имеющие весьма высокую твердость. В процессе формирования металлизационного слоя происходит остывание материала на холодной поверхности. Материал покрытия уменьшается в объеме и подвергается вследствие этого большому термическому напряжению, приводящим к возникновению остаточных внутренних напряжений, а в отдельных случаях — к разрушению материала (растрескиванию). Напыленный материал по сравнению с исходным обладает большей хрупкостью, а твердость его, как правило, значительно выше исходной. К таким покрытиям относятся сплавы на никелевой и железной основе.

Таблица 11.9

Фазовый состав покрытий

Тип покрытия			
Самофлюсующиеся сплавы	Никель-титановые сплавы	Никель-алюминиевые сплавы	Железные эвтектические сплавы
Твердый раствор на основе никеля; легкоплавкая эвтектика $\gamma\text{-Ni}_3\text{B}$; карбиды бора и никеля; бориды хрома; сложные карбобориды	Интерметаллиды титана с никелем; оксиды титана; твердый раствор на основе никеля	Интерметаллиды никеля с алюминием; твердый раствор на основе никеля; бориды никеля	Твердый раствор на основе железа; бориды хрома и никеля; интерметаллиды

К характерным особенностям обработки резанием металлических покрытий относятся:

□ хрупкость обрабатываемого материала, приводящая к специфическому процессу стружкообразования, когда нагрузки от резания сосредоточиваются непосредственно на режущей кромке. Концентрация напряжений вызывает повышенный износ у вершины резца;

□ высокое истирающее воздействие на рабочие поверхности инструмента, обусловленное наличием в покрытии включений высокой твердости, которые также препятствуют пластическому деформированию в процессе стружкообразования;

□ пониженная теплопроводность покрытий вследствие их пористости, наличия оксидов, а в некоторых случаях — и свойств напыляемого материала;

□ трудность получения поверхностей высокого качества вследствие специфического строения слоя покрытия. Изнашивание инструмента в процессе обработки вызывает местные разрушения поверхности покрытия — выкрашивание, отслаивание, появление чешуек.

Процессы резания существенно различаются в зависимости от состава и свойств покрытий. Наиболее близко к условиям обработки монолитных материалов резание покрытий из сталей и цветных сплавов. При их точении обычно используются твердые сплавы ВК6, ВК6-М, ВК3-М (группа М по ИСО); стружка отличается повышенной хрупкостью, периоды стойкости близки к известным для монолитных материалов такого же состава.

При точении самофлюсующихся сплавов образуется стружка надлома или сливная в виде мелких витков повышенной хрупкости. В качестве инструментальных материалов рекомендуются твердые сплавы группы ВК (ВК3, ВК4, ВК6-ОМ) либо сверхтвердые материалы на основе нитрида бора. В первом случае уровень скоростей резания v_{60} лежит в пределах 30...50 м/мин, во втором — 60...130 м/мин в зависимости от твердости обрабатываемого сплава (см. рис. 11.16). Подача определяется требованиями к шероховатости обработанной поверхности, но не должна превышать 0,15 мм/об из-за возможного скалывания режущих кромок. Покрытия, в том числе самофлюсующиеся сплавы, обладают пониженной пластичностью. Вследствие этого уменьшаются размеры контактной площадки на передней поверхности, контактные напряжения концентрируются вблизи режущей кромки, вызывая ее разрушение. Силы резания в 1,5–2 раза превышают силы при обработке закаленной стали той же твердости. Поэтому рекомендуется работать резцами с отрицательными передними углами: до -25° для твердых сплавов и -10° для сверхтвердых материалов. Технологическим критерием затупления служит износ по задней поверхности 0,4 мм при черновой обработке и 0,2 мм при чистовой.

Шлифование самофлюсующихся сплавов производится кругами из карбида кремния зернистостью 25...40 и твердостью СМ1 – СТ1. В большинстве случаев круги нуждаются в принудительной правке для восстановления режущей способности. Более результативно использование алмазных кругов на металлических или бакелитовых связках соответственно для черновой или чистовой обработки. При выборе типа алмазных кругов рекомендуется использовать 100...150% -ю концентрацию алмазного зерна. Высокая концентрация алмазов увеличивает поверхность резания и снижает степень

нагрева покрытия. Она обеспечивает также более экономное использование кругов. Достижимый уровень шероховатости поверхности определяется в первую очередь зернистостью круга (табл. 11.10).

Таблица 11.10

Влияние зернистости алмазного круга на шероховатость
обработанной поверхности [3]

Размер зерна, мкм	R_a , мкм
125...160	0,63...1,25
50...63	0,32...0,50
40	0,20...0,40

Скорость шлифования самофлюсующихся сплавов рекомендует-ся в пределах 25...35 м/с. Продольные и поперечные подачи близки к рекомендуемым для чистового шлифования твердых сплавов. В качестве СОЖ используется 5% -й раствор эмульсола в воде.

Обработка покрытий, не подвергаемых оплавлению, имеет ряд отличительных особенностей. В связи со слабой силой сцепления частиц сплава силы резания при точении таких покрытий несколько меньше, чем при обработке самофлюсующихся сплавов. Характерно, что силы резания P_y и P_x превышают P_z . Ранее отмечалось (см. § 11.5), что такое соотношение свидетельствует о значительном уровне сил резания на задней поверхности резца. В результате повышенной хрупкости обрабатываемого материала размеры площадки контакта на передней поверхности уменьшаются, напряжения концентрируются вблизи режущей кромки, вследствие чего возможны ее сколы. При обработке ряда материалов силы резания могут увеличить силы адгезионного и когезионного сцепления материала покрытия с передней поверхностью, что приводит к межслойному разрушению покрытия и отделению его от основы.

В работе резца наблюдается три периода:

1) на обработанной поверхности образуется микрорельеф такого же вида, как и при обработке монолитных материалов: остаточные гребешки, как правило, без дефектов в виде отдельных выкрашиваний на выступах;

2) по мере работы резца возрастает шероховатость обработанной поверхности; это проявляется в виде разрушения гребешков и образования отдельных участков (в пределах трех-четырёх выступов) практически без гребешков; высота микронеровностей резко возрастает;

3) при катастрофическом износе в одних случаях происходит практически полное разрушение поверхностного слоя обработанного покрытия в виде чешуйчатости сначала отдельных участков, а затем и всей поверхности; в других, наряду с чешуйчатостью, — полное разрушение и отслаивание покрытия.

При обработке NiAl-сплавов (типа ПН85Ю15) рекомендуется использовать режцы из композита 10 с $\gamma = -(10...20^\circ)$. Уровень скоростей резания v_{15} лежит в пределах 70...100 м/мин, подач 0,02...0,06 мм/об., шероховатость обработанной поверхности $Ra \leq 2,5$ мкм. В качестве СОЖ целесообразно использовать масла.

При шлифовании NiTi-сплавов второй группы (см. табл. 11.9) можно использовать как абразивные, так и алмазные круги. В частности, при черновой обработке рекомендуются круги из карбида кремния зеленого 64С 40 СМ2 6 К5, алмазные круги на металлической связке типа АС16 315/250МВ1 4. При чистовой обработке рекомендуются круги на бакелитовой связке меньшей зернистости, а для сплавов на железной основе — круги из эльбора типа ЛО25 4 С1 К7. В качестве СОЖ при черновом шлифовании рекомендуются масла, при чистовой могут применяться водные растворы электролитов.

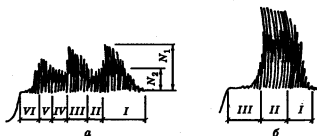


Рис. 11.18. Характер изменения мощности резания при шлифовании покрытий

При использовании абразивных кругов необходимо обеспечить режим самозатачивания, который характерен периодическим затуплением и обновлением режущих зерен. Это хорошо иллюстрируется осциллограммой изменения мощности при шлифовании покрытий (рис. 11.18, а). В процессе шлифования мощность непрерывно возрастает до N_1 (участок I), после чего резко падает до N_2 (участок II), что связано с выкрашиванием зерен на поверхности круга. Далее цикл повторяется (участки III–V). Последний участок (VI) со-

ответствует процессу выхаживания. При шлифовании сплавов ПН55Т45 и ПН85Ю15 алмазными кругами, а сплава ХТН-23 — кругами из альбора мощность стабилизируется (рис. 11.18, б, где I — врезание; II — снятие припуска; III — выхаживание). Уровень мощности при шлифовании указанных сплавов достаточно велик: при $S_{2x} = 0,02$ мм за двойной ход и $S_{пр} = 2$ м/мин она достигает 3...5 кВт.

11.3. Особенности резания пластмасс

Разновидности пластмасс. Для изготовления различных деталей машин широко применяются пластмассы. К их достоинствам следует отнести небольшую плотность, удовлетворительную прочность, высокие антифрикционные, шумо- и вибропоглощающие свойства, достаточно высокую антикоррозионную стойкость, небольшую трудоемкость изготовления деталей из них.

Процесс резания пластмасс определяется видами наполнителя и связующего материала, а также технологическим процессом их получения. Классификация пластмасс с точки зрения обрабатываемости приведена в табл. 11.11.

Таблица 11.11

Возможности обработки пластмасс [20]

Группа материалов	Виды материалов	Способ обработки		
		Точение	Сверление	Фрезирование
Термопластичные без наполнителя	Оргстекло, фторопласт, капрон, винилпласт, полиэтилен	+	+	+
Термопластичные с наполнителем в виде:				
газов	Вспененный полистирол	-	+	+
волокон и фольги	Фольгированный полиэтилен		+	+
порошков	Фторопласт или полистирол с порошками меди, дисульфида молибдена, свинца и др.	+	+	+
Термореактивные с газообразующим наполнителем	Пенопласт, поролон	+	+	+
Термореактивные с порошковым наполнителем	Аминопласты, фенопласты, пресс-порошки	+	+	+

Окончание табл. 11.11

Группа материалов	Виды материалов	Способ обработки		
		Точение	Сверление	Фрезерование
Термореактивные с волокнистым наполнителем	Волокниты, стекловолокниты	+	+	+
	Армометаллотекстолит		+	+
Термореактивные со слоистым и листовым наполнителем на основе:				
	бумаги, ткани	+	+	+
	фольги		+	+
	стекловолокна	+	+	+
	Гетинакс, текстолит			
	Фольгированные слоистые пластики			
	Стеклотекстолиты, стеклопластики			

Термопластичные материалы под действием повышенной температуры размягчаются, сохраняя свою плавкость и растворимость, и допускают повторное формование, а термореактивные материалы под действием температуры и давления переходят в необратимое неплавкое и нерастворимое состояние, т.е. при нагревании не размягчаются.

Основные механические свойства пластмасс зависят от вида смолы и характера наполнителя. Прочность отдельных видов древесно-слоистых пластмасс и стеклопластиков приближается к прочности углеродистой стали и иногда превосходит прочность чугуна, бронзы, алюминия, меди.

Отмечая положительные свойства пластмасс, необходимо учитывать и целый ряд их недостатков: низкие теплопроводность и теплостойкость, старение под действием температуры и влажности, ползучесть. Теплопроводность пластмасс в 500–600 раз ниже теплопроводности металлов, а детали из них могут работать в интервале температур от –60 до 200 °С. Исключение составляют пластмассы на основе кремнийполимеров и фторопластов, детали из которых могут удовлетворительно работать при температурах до 300...350 °С.

Старение пластмасс протекает значительно интенсивнее, чем металлов, что приводит к существенному ухудшению первоначальных механических свойств. К тому же ползучесть пластмасс выражается гораздо сильнее, чем ползучесть металлов.

Чтобы оценить свойства пластмасс с точки зрения обрабатываемости их резанием, необходимо ознакомиться с некоторыми вопросами механизма стружкообразования, уровнем сил, деформаций и температур, возникающих в процессе резания.

Стружкообразование. Изучение стружек, образуемых в процессе резания пластмасс, как и при обработке металлов, позволяет судить о различных явлениях, происходящих в зоне резания (уровне деформации, температуры), а также о качестве обработанных поверхностей.

При обработке слоистых термореактивных пластмасс, обладающих анизотропными свойствами, образуются стружки разного вида. Резание вдоль слоев наполнителя сопровождается образованием стружки типа сливной. Прочность такой стружки очень мала. Обработка перпендикулярно к слоям наполнителя во всех случаях приводит к образованию стружки надлома, а следовательно, к прерывистому резанию. Изменение режима резания в данном случае практически не влияет на характер стружкообразования. Вместе с тем с возрастанием износа инструмента раздробленность стружки надлома увеличивается, цвет ее изменяется, что указывает на резкое возрастание температуры в зоне резания.

Непрерывная стружка скалывания соответствует сливной стружке при обработке металлов. Образуется она в результате скалывания, направленного вдоль плоскости сдвига, при малых интервалах между элементами сдвига. Для непрерывной стружки скалывания характерно то, что следы сдвига частично остаются на поверхности стружки, а толщина ее обычно больше толщины срезаемого слоя. Условия резания и материал, при обработке которого обеспечивается получение стружки данного вида, считаются приемлемыми для достижения высокого качества обработанной поверхности.

Если стружка образуется скалывающим действием вдоль плоскости сдвига со значительными интервалами между элементами сдвига, следует ожидать появления обычной прерывистой стружки скалывания. Такая стружка образуется, когда напряжения в плоскости сдвига становятся больше предела прочности материала. Обработанная поверхность при этом очень грубая. В связи с этим следует избегать таких условий обработки, при которых появляется прерывистая стружка скалывания.

Стружка надлома образуется при обработке термореактивных пластмасс. В последнем случае она состоит из большого количества мелких отдельных частиц и пыли независимо от того, каким инструментом и при каких режимах производится обработка.

Резание термопластичных пластмасс почти во всех случаях сопровождается образованием сливной стружки, хотя по мере увеличения подачи может наблюдаться переход от сливной стружки к элементной. Появление элементной стружки во многом определяется количеством выделившейся теплоты и температурой в зоне резания. Если теплота резания достаточна и срезаемый слой размягчается, получается сливная стружка, а если теплоты недостаточно для разогрева стружки, — элементная.

При резании пластмасс стружка образуется главным образом вследствие преодоления упругих деформаций, а упруго сжатый во время резания материал после прохождения режущего лезвия упруго восстанавливается. Упругое последствие для соответствующих материалов и режимов резания будет различно, но значительно выше, чем при обработке сталей. В большинстве случаев упругое последствие приводит к возникновению за режущим лезвием инструмента напряжений, которые могут превышать временное сопротивление обрабатываемых пластмасс и вызывают появление разрывов и трещин на обработанной поверхности.

Установлено [7], что при резании пластмасс образуются следующие наиболее характерные типы стружек: непрерывная сливная, непрерывная скалывания, простая и сложная прерывистая скалывания, а также прерывистая с трещинами (рис. 11.19).

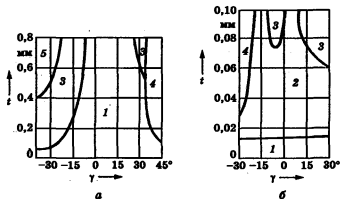


Рис. 11.19. Влияние глубины резания и переднего угла на форму стружки при точении:

- а* — полистирола; *б* — гетинакса; 1 — непрерывная скалывания; 2 — простая прерывистая скалывания; 3 — сложная прерывистая скалывания; 4 — прерывистая с трещинами; 5 — стружка не образуется

При обработке полиэтиленов, обладающих высокой упругостью и большим удлинением при разрушении, с малыми скоростями резания образуется непрерывная сливная стружка. Толщина ее примерно равна глубине резания вследствие того, что деформация стружки преимущественно упругая. При обработке сталей сливная стружка, наоборот, получается вследствие интенсивной пластической деформации.

При обработке пластмасс желательное образование сливной стружки, так как в этом случае при подборе соответствующих режимов резания и геометрических параметров достигается высокая точность обработки.

Крайне нежелательно образование стружек скалывания сложной прерывистой и прерывистой с трещинами. Первый тип стружки образуется, например, при обработке полистирола с отрицательным передним углом в результате сложного напряженного состояния обрабатываемого материала, когда сжимающие напряжения взаимодействуют с напряжениями сдвига. Второй тип стружки возникает при резании хрупких материалов, например фенопластов, полиэфиров или эпоксидных смол, а также термопластов инструментами с большими передними углами γ (до 40°) и при большой глубине резания. Опережающая трещина обычно направлена вглубь обрабатываемого материала, что приводит к образованию весьма грубой обработанной поверхности с наличием зазубрин и трещин.

Силы резания. В процессе обработки пластмасс на режущий клин инструмента действуют силы, приложенные к передним и задним его поверхностям. Однако соотношение этих сил будет иным, чем при обработке металлов. Вследствие упругого последействия силы, действующие по задним поверхностям инструмента, превосходят силы, действующие по его передней поверхности.

Так как пластмассы обладают более низкими механическими свойствами по сравнению с металлами, силы резания при их обработке значительно меньше, а соотношение P_z , P_y и P_x будет иным. Например, при точении термоактивных и термопластичных пластмасс сила P_z соответственно в 10–15 и 10–20 раз меньше, чем при резании металлов, а сила P_y составляет 85...95 % от силы P_z [20]. С увеличением скорости резания силы резания сначала возрастают, а затем снижаются. Вместе с тем по абсолютной величине изменения сил при различных скоростях резания настолько малы, что при выводе формул для определения сил резания ими пренебрегают.

С увеличением глубины резания и подачи силы резания возрастают, особенно заметно с ростом износа инструмента. Например,

при точении стеклотекстолита СТ резцом, оснащенным пластиной твердого сплава ВК2, с $v = 300$ м/мин, $S = 0,21$ мм/об, $t = 3$ мм силы P_z , P_y и P_x с повышением износа реза h_a от 0,1 до 0,85 мм увеличиваются: P_z — на 260 %, а P_y и P_x — на 116 %.

На силы резания при обработке пластмасс влияют и свойства инструментального материала. Наименьшие силы резания наблюдаются при использовании алмазного инструмента. Так, при точении термоактивных пластмасс алмазными резцами P_z и P_y уменьшаются соответственно в 2 и 5–6 раз по сравнению с обработкой твердосплавными резцами. Снижению сил при резании алмазными инструментами способствуют низкий коэффициент трения алмаза, значительно меньший, чем у твердосплавных, радиус округления режущих лезвий, а следовательно, и меньшее влияние упругого последействия обработанной поверхности пластмасс на заднюю поверхность режущего клина инструмента. По тем же причинам увеличение износа алмазного инструмента в меньшей степени сказывается на росте сил резания.

Температура в зоне резания. Соотношения составляющих теплового баланса при резании пластмасс и металлов существенно различаются. Так, сливная стружка уносит большую часть теплоты, чем стружка надлома. Основная же часть теплоты резания переходит в режущий инструмент из-за низкой теплопроводности пластмасс, особенно терморезистивных. И хотя твердые сплавы могут без заметного ухудшения режущих свойств выдерживать температуру выше 900 °С, концентрация в инструменте выделяющейся при резании пластмасс теплоты способствует интенсивному его изнашиванию.

Теплота резания в значительной степени изменяет свойства обрабатываемого материала. Поскольку теплостойкость большинства конструкционных пластмасс не превышает 300 °С, при обработке термопластичных пластмасс наблюдается оплавление обрабатываемой поверхности и налипание срезаемой стружки на инструмент. Обработанная поверхность получается грубой, с задирами и сильно искаженной формой и размерами, а в отдельных случаях процесс резания становится вообще невозможным.

Снижение температур в зоне резания при обработке пластмасс достигается:

□ за счет уменьшения сил трения между обрабатываемым материалом и задней поверхностью лезвия инструмента, а также между стружкой и передней поверхностью лезвия в случае применения тщательно полированного инструмента;

□ при использовании алмазного инструмента, который имеет значительно меньший коэффициент трения с обрабатываемым материалом по сравнению с другими инструментальными материалами и более высокий коэффициент теплопроводности;

□ при использовании инструментов с максимально большими передним и задним углами, на резание которыми затрачивается минимальная работа, а следовательно, минимальным будет и тепловыделение;

□ при охлаждении сжатым воздухом или охлаждающей жидкостью, совместимой с видом пластмассы. При этом следует помнить, что некоторые пластмассы поглощают влагу, и в таких случаях применение охлаждающих жидкостей исключается;

□ путем подбора соответствующих режимов резания; при этом наиболее сильное влияние на температуру в зоне обработки оказывает скорость резания.

Изнашивание инструмента. В качестве инструментальных материалов для обработки пластмасс используются быстрорежущие стали, твердые сплавы группы ВК и алмазы. Изнашивание инструментов из названных материалов протекает в основном по задней поверхности и по своей природе является абразивно-механическим. Это объясняется тем, что силы, приложенные к передней поверхности инструмента, очень малы из-за низкой твердости пластмасс и не могут вызывать ее существенного истирания. В то же время вследствие повышенной упругости пластмасс силы, действующие со стороны задних поверхностей лезвий, значительны и инструмент изнашивается очень активно. Отсутствие изнашивания инструмента по передней поверхности и равномерное монотонное изнашивание по задней исключают катастрофический период их изнашивания, как это бывает у инструментов, работающих по металлу. Вместе с тем периоды приработки и нормального изнашивания характерны и для инструментов, применяемых при обработке пластмасс.

Изнашивание быстрорежущих и твердосплавных инструментов при низких скоростях резания происходит в основном из-за абразивного истирания режущих лезвий. С увеличением скоростей резания растет количество выделившейся теплоты и интенсивность изнашивания. У твердосплавных инструментов при соответствующих условиях обработки может наблюдаться хрупкое выкрашивание частиц.

Режущая способность алмазных инструментов значительно выше, чем твердосплавных и быстрорежущих. Изнашивание алмаза

происходит по задним поверхностям с образованием на них площадок с множеством микрокромки. В процессе резания и нарастания износа режущие микрокромки постоянно обновляются и острота их, а следовательно, и силы резания, практически не изменяются. Особенно большие периоды стойкости имеют инструменты из синтетических поликристаллических алмазов, в которых развитие микротрещин на площадках износа локализовано границами отдельных зерен и блоков, в то время как в природных монокристаллах алмаза микротрещины могут распространяться на весь кристалл. Подобный характер изнашивания инструментов из синтетических алмазов определяет их высокие периоды стойкости и долговечность. В силу этого при использовании синтетических алмазов для обработки пластмасс можно рекомендовать максимально допустимые скорости резания.

Как уже указывалось, у инструментов, обрабатывающих пластмассы, отсутствует период катастрофического изнашивания, поэтому в качестве критерия затупления может быть рекомендован только технологический. Он соответствует износу инструмента, при котором отклонения от геометрической формы и качественные характеристики обработанных поверхностей становятся выше допустимых техническими требованиями к детали. Таким образом, особенности, характерные для обработки пластмасс резанием, следующие [11]:

□ склонность ряда пластмасс к скалыванию в процессе резания, что приводит к выкрашиванию поверхностей заготовок на входе и выходе инструмента и увеличению шероховатости поверхности. Поэтому режущий клин инструмента должен иметь большие передние и задние углы, а износ по задней грани не должен превышать, например у сверл, $0,1...0,5$ мм, фрез — $0,4...0,5$ мм при черновой обработке и $0,2...0,3$ мм при чистовой. Увеличение износа способствует возрастанию шероховатости обработанной поверхности;

□ трудности достижения низкой шероховатости обработанной поверхности вследствие неоднородности строения пластмассы и различной твердости ее составных частей. В силу этого износ инструмента, применяемого для обработки пластмасс, лимитируется обычно технологическим критерием затупления, и прежде всего увеличением шероховатости обработанной поверхности;

□ сильное абразивное воздействие на инструмент при обработке отдельных видов пластмасс, например стеклотекстолита, имеющего составляющие с повышенными абразивными свойствами. Резец при обработке таких материалов изнашивается сильнее, чем при обработке сталей 30, 50 и чугуна [11, 20];

□ пониженная теплопроводность пластмасс, обуславливающая плохой теплоотвод из зоны резания, а следовательно, резкий нагрев лезвий режущих инструментов, а также оплавление, задиры и разрушение обработанной поверхности;

□ интенсивное пылеобразование, особенно при обработке термоактивных пластмасс, и выделение вредных газов, что требует отсасывающих устройств;

□ трудность применения СОЖ из-за гигроскопичности пластмасс отдельных видов или образования пасты из пыли и СОЖ, которая налипает на поверхности деталей станка, вызывая их коррозию, попадает на инструмент, затрудняя обработку; поэтому при обработке пластмасс чаще всего для охлаждения применяют сжатый воздух;

□ сложность достижения высокой точности деталей из-за их большого упругого прогиба, повышенного коэффициента линейного расширения пластмасс, интенсивного изнашивания инструмента и других факторов.

Особенности резания керамических

11.9. материалов

Общие сведения. Человечество использует изделия из керамики уже тысячи лет, однако только в течение последних 20–30 лет резко расширилась область их применения и химический состав. В настоящее время в таких областях, как электротехника, электроника, машиностроение, химические технологии, авиация и космонавтика, оптика, медицина, используется более 50 групп керамических материалов различных составов и свойств [34]. Такое бурное развитие вызвано, с одной стороны, колоссальным количеством возможных химических соединений (уже известно более 9200 двухкомпонентных и 3800 трехкомпонентных), а с другой — разнообразием физических, механических и прочих свойств, расширяющих область использования керамики. К таким свойствам относятся высокая твердость, определенные пределы относительной диэлектрической проницаемости, пьезоэлектрические свойства, высокая ионная проводимость, высокая магнитная проницаемость, прозрачность, высокое сопротивление радиоактивному облучению, термическая и электрическая изоляция, высокая температура плавления, жаропрочность, сопротивление абразивному изнашиванию, коррозионная стойкость, сопротивление ползучести, малая плотность.

Следует отметить, что для производства керамических материалов широко используются технологии порошковой металлургии (прессование + спекание, горячее прессование и др.), обеспечивающие возможность получения деталей с заранее определенными составом и свойствами. Все разновидности керамики можно условно разделить на две группы: 1) функциональные; 2) конструкционные [34].

К *функциональным* относятся керамики, предназначенные для выполнения определенной функции:

□ изоляционные на основе Al_2O_3 , BeO , MgO , AlN , $SiC+BeO$, используемые в качестве покрытий изделий электротехники и электроники;

□ ферроэлектрики на основе $BaTiO_3$, $SiTiO_3$ для керамических конденсаторов;

□ пьезоэлектрические материалы на базе $Pb(Zr,Ti)O_3$, являющиеся основой пьезоэлектрических датчиков и генераторов ультразвуковых колебаний;

□ полупроводники на основе SiC , $BaTiO_3$, V_2O_5 и других оксидов, используемые при производстве датчиков и компенсаторов температуры, термоэлементов, нагревателей и т.п.;

□ материалы с ионной проводимостью на основе $\beta-Al_2O_3$, ZrO_2 для производства датчиков кислотности, кислорода и т.п.;

□ мягкие ферриты на основе $M^{II}Fe_2O_4$ ($M^{II} = Zn, Mn; Zn, Ni$), используемые для изготовления записывающих устройств в магнитофонах, сердечников, датчиков температуры и т.д.;

□ твердые ферриты из $MO_6Fe_2O_4$ ($M = Ba, Sr, Pb$), применяемые для изготовления постоянных магнитов, миниатюрных электродвигателей и т.п.;

□ оптические материалы на основе Al_2O_3 , MgO , $3Al_2O_3+2SiO_2$ (для производства осветительной аппаратуры), $Y_2O_3+ThO_2$ (лазеры); $(Pb, La)(Zr, Ti)O_3$ для производства изделий оптоэлектроники;

□ материалы, выполняющие различные химические функции и используемые в качестве датчиков влажности, катализаторов, электродов и т.д.

К *конструкционным* относятся материалы, которые независимо от формы детали должны обеспечивать ее механическую прочность, т.е. выдерживать растягивающие, сжимающие, изгибающие нагрузки:

□ биокерамика на основе Al_2O_3 , ZrO_2 , гидроксиапатитов для производства эндопротезов, сердечных клапанов и т.п.;

□ машиностроительные материалы — жаропрочные (для производства элементов поршневых двигателей, клапанов, камер сгорания

и сопел, подшипников и т.п.), инструментальные (для производства лезвийных и абразивных инструментов), с высоким сопротивлением изнашиванию (для производства подшипников, направляющих, сопел и др.);

□ термоизоляционные материалы, используемые при производстве излучателей и термозащитных покрытий.

Некоторые свойства и области применения керамических материалов приведены в табл. 11.12.

Таблица 11.12

Некоторые свойства и области применения керамики [34]

Свойства	Область применения									
	Производство нитей из стекловолокна и т.п.	Свечи двигателей внутреннего сгорания	Термоизоляция космических кораблей	Изоляторы высокого напряжения	Гнезда клапанов двигателей	Фальшры	Роторы турбинных двигателей	Эндопротезы	Режущие пластины	Датчики газа
Термическая стойкость		+	+		+	+	+		+	
Термоизоляция			+	+						
Электроизоляционные		+								
Магнитные										+
Механическая прочность				+			+	+	+	
Сопротивление истиранию	+				+			+	+	
Коррозионная стойкость					+	+		+		+
Химическая активность										+
Биологическое средство								+		
Сопротивление термическим ударам		+	+				+			
Заданная пористость						+		+		
Сопротивление динамическим нагрузкам									+	
Огнеупорность	+	+	+	+	+	+	+		+	+
Твердость				+			+		+	
Водонепроницаемость		+		+						

Стружкообразование при резании керамических материалов. Резание керамических материалов имеет целый ряд особенностей, связанных с их строением и свойствами. Согласно [34], процесс образования стружки при резании керамики состоит из следующих стадий:

1) изменение напряженного состояния в теле детали в момент контакта с режущим лезвием (рис. 11.20, а);

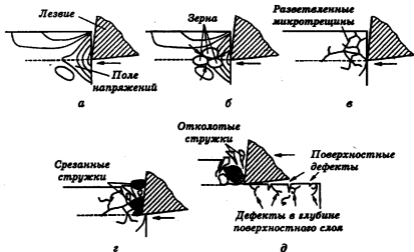


Рис. 11.20. Стадии формирования стружки при резании керамических материалов [34]

2) начальный этап трещинообразования (рис. 11.20, б) — под действием возникших напряжений немедленно начинается образование микротрещин, в основном в местах их концентрации (на границах зерен, различных фаз, в местах повышенной плотности дислокаций и т.п.);

3) распространение трещинообразования (рис. 11.20, в) — по мере внедрения лезвия в обрабатываемый материал и расширения поля напряжений расширяется область возникновения микротрещин как между зернами, так и внутри их;

4) формирование стружки (рис. 11.20, д) — в процессе движения лезвия образуется разветвленная система микротрещин; в зависимости от ее структуры обрабатываемый материал может оставаться в контакте с передней поверхностью или перемещается из зоны стружкообразования. В результате наблюдается два типа стружек: срезанные, образованные в результате непосредственного воздей-

вия передней поверхности и высоких температур резания, и сколотые, образованные в результате распространения микротрещин;

5) формирование дефектов обработанной поверхности (рис. 11.20, *д*) — микротрещин непосредственно на поверхности и в глубине поверхностного слоя в результате изменений напряженного состояния в этом слое.

Токарная обработка. Обрабатываемость керамики в значительной мере определяется температурой ее спекания. При относительно низких температурах спекания возможна обработка детали резцами из твердых сплавов или минералокерамики, при использовании более высоких температур — резцами из поликристаллического нитрида бора или алмаза. С учетом особенностей стружкообразования рекомендуется использовать отрицательные передние углы и фаски на передней поверхности до -30° , а также максимально возможные задние углы. Скорости резания обычно не превышают 20 м/с, подачи — менее 0,05 мм/об, глубина резания — до 0,5 мм [34]. Стеклокерамику (кристаллические растворы оксидов Al_2O_3 , MgO, K_2O в β -кварце с остаточной стекловидной фазой на границах зерен) можно обрабатывать практически всеми инструментальными материалами; при этом уровень стойкости будет изменяться в том же направлении, что и при обработке металлов.

В качестве СОТС хорошо зарекомендовали себя жидкости на водной основе, позволяющие резко снижать температуры резания и интенсивность изнашивания. Весьма эффективно охлаждение

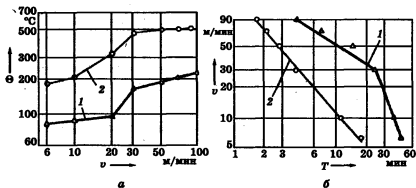


Рис. 11.21. Влияние условий охлаждения на температуру резания (*а*) и стойкость алмазного резца (*б*) при точении керамики, содержащей 96 % Al_2O_3 ($S = 0,1$ мм/об, $t = 0,3$ мм) [33]:

1 — охлаждение жидким азотом; 2 — охлаждение с помощью СОЖ

реза путем внутреннего подвода жидкого азота: температура резания в этом случае снижается в 2 раза, а стойкость может возрасти в 3 и более раз (рис. 11.21).

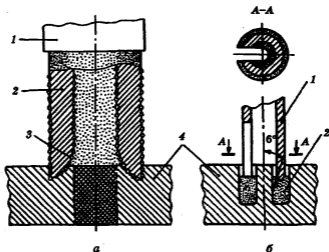


Рис. 11.22. Обработка отверстий в керамике кольцевыми алмазными сверлами:

- а — со сферической внутренней поверхностью [25];
 б — разрезными [26]; 1 — трубчатая оправка; 2 — алмазная коронка;
 3 — сферическая поверхность; 4 — деталь



Рис. 11.23. Изменения механизма стружкообразования при шлифовании керамики

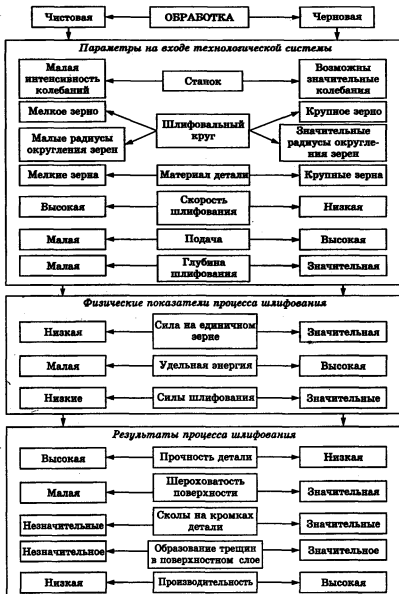


Рис. 11.24. Закономерности шлифования керамики [32]

Сверление. Для сверления отверстий в деталях из керамических материалов могут использоваться спиральные твердосплавные сверла с покрытиями из поликристаллических алмазов или нитрида бора. Однако более эффективны кольцевые алмазные сверла, обрабатывающие отверстия диаметром свыше 1 мм (рис. 11.22).

Шлифование. Абразивное шлифование керамических материалов затрудняется тем, что материалы зерна круга и детали — часто одни и те же либо близки по свойствам. Поэтому для шлифовальной обработки керамики используются преимущественно круги из сверхтвердых материалов. Можно выделить две основных разновидности шлифования керамики: в условиях пластического и в условиях хрупкого резания шлифуемого материала (рис. 11.23). Такой характер шлифования обусловлен связями между энергиями пластического и хрупкого разрушения и глубиной врезания зерна в обрабатываемый материал [29]. Первый вариант возможен, если нагрузка на абразивное зерно либо соответствующая ему глубина шлифования не превышает критического (порогового) уровня (рис. 11.23, I–II). В случае превышения этого уровня (второй вариант) доминируют процессы хрупкого разрушения (рис. 11.23, III). Два названных варианта установлены соответственно при чистовом и черновом шлифовании.

Закономерности шлифования керамики указаны на рис. 11.24.

Литература

1. *Бердичевский Е.Г.* Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки материалов: Справочник / Е.Г. Бердичевский. М.: Машиностроение, 1984.
2. *Бобров В.Ф.* Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. М.: Машиностроение, 1975.
3. *Борисов Ю.С.* Плазменные и порошковые покрытия / Ю.С. Борисов, А.Л. Борисов. Киев, Техніка, 1986.
4. *Вульф А.М.* Резание металлов / А.М. Вульф. Л.: Машиностроение, 1973.
5. *Ивкович В.* Трибология резания (смазывающе-охлаждающие жидкости) / В. Ивкович; Под ред. П.И. Ящерицына. Мн.: Наука и техника, 1982.
6. *Клушин М.И.* Резание металлов: В 3 ч. / М.И. Клушин. Горький: ГПИ, 1967. Ч. 2.
7. *Кобаяши А.* Обработка пластмасс резанием / А. Кобаяши. М.: Машиностроение, 1974.

8. Макаров А.Д. Анализ характеристик обрабатываемости и параметров оптимизации процесса резания / А.Д. Макаров // Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. «Современные пути повышения производительности и точности металлообрабатывающего оборудования и автоматизации технологических процессов в машиностроении». М., 1980. С. 146–149.
9. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания / А.Д. Макаров М.: Машиностроение, 1976.
10. Обработка резанием жаропрочных, высокопрочных и титановых сплавов / Н.И. Резников [и др.]. М.: Машиностроение, 1972.
11. Подураев В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов / В.Н. Подураев. М.: Машиностроение, 1974.
12. Режимы резания труднообрабатываемых материалов: Справочник / Я.Л. Гуревич [и др.]. М.: Машиностроение, 1976.
13. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А.Н. Резников. М.: Машиностроение, 1981.
14. Резников А.Н. Теплофизика резания / А.Н. Резников. М.: Машиностроение, 1969.
15. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием: Справочник / Под ред. С.Г. Энгелиса, Э.М. Берлинера. М.: Машиностроение, 1986.
16. Фельдштейн Э.И. Обрабатываемость сталей в связи с условиями термической обработки и микроструктурой / Э.И. Фельдштейн. М.: Машгиз, 1953.
17. Фельдштейн Е.Э. Финишная механическая обработка деталей из порошковых материалов / Е.Э. Фельдштейн, В.А. Николаев. Мн.: Выш. шк., 1987.
18. Худобин Л.В. Техника применения смазочно-охлаждающих средств в металлообработке / Л.В. Худобин, Е.Г. Бердичевский. М.: Машиностроение, 1977.
19. Шевченко М.И. Влияние модифицирования кальцием цементуемых сталей на их обрабатываемость и трение при резании: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Горький, 1984.
20. Штучный Б.П. Механическая обработка пластмасс: Справочник / Б.П. Штучный. М.: Машиностроение, 1987.
21. Яшин Ю.Д. Исследование влияния состава и морфологии избыточных фаз на обрабатываемость резанием низкоуглеродистой автоматной стали: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Горький, 1980.
22. А.с. 614892 СССР. Способ определения оптимальной скорости резания/А.А. Виноградов. Опубл. в Б. И. 1978, № 26.

23. А.с. 679320 СССР. Способ определения оптимальной скорости резания / И.С. Праведников, Р.З. Самигуллин. Оpubл. в Б. И. 1979, № 30.
24. А.с. 841799 СССР. Способ определения оптимальной скорости резания / А.И. Хватов, А.И. Танашин, В.В. Никулин. Оpubл. в Б. И. 1981, № 24.
25. А.с. 1159724 СССР. Алмазное кольцевое сверло / А.Ю. Виноградов, В.И. Маринин, Г.П. Грязнов, Ю.В. Светалкин. Оpubл. в Б.И. 1985, № 21.
26. А.с. 1209459 СССР. Алмазное сверло / В.Х. Нурмухамедов [и др.]. Оpubл. в Б.И. 1986, № 5.
27. А.с. 1211639 СССР. Способ неразрушающего контроля обрабатываемости заготовок из углеродистых сталей / Н. В. Овчинникова [и др.]. Оpubл. в Б. И. 1986, № 6.
28. *Bendixen I.* Versuch der Aufstellung einer Bearbeitbarkeitskennziffer auf Grund der Schnittkraft / I. Bendixen // *Werkstatt und Betrieb.* 1960. Bd. 93. № 3. S. 141–146.
29. *Bi Zhang.* Material-removal mechanisms in grinding ceramics / Bi Zhang, T.D. Howes // *Annals of CIRP.* 1994. V. 43. № 1. P. 305–308.
30. *Byrnel G.* Advancing Cutting Technology / G. Byrnel, D. Dornfeld, B. Denkena // *Annals of CIRP.* 2003. V. 52. № 2. P. 483–509.
31. *Eastman M.* Machining MMC's / M. Eastman, Ch. Lane // *Cutting Tool Engineering.* 1993. V. 45. № 7. P. 38–43.
32. *Cronjäger L.* Machining of fibre and particle reinforced aluminium / L. Cronjäger, D. Meister // *Annals of CIRP.* 1992. V. 41. № 1. P. 63–66.
33. *Kim J.-Du.* Keramik mit tiefgekühlten Werkzeugen zerspanen / J.-Du Kim, J.-B. Lee // *Werkstatt und Betrieb.* 1993. Bd. 126. № 3. S. 159–162.
34. *Oczós K.E.* Kształtowanie ceramicznych materiałów technicznych / K.E. Oczós. Rzeszów: Oficyna Wydawnicza Polit. Rzesz., 1996.
35. *Subramanian K.* A system approach for grinding of ceramics / K. Subramanian, P.D. Redington, S. Ramanath // *Am. Ceram. Soc. Bull.* 1994. V. 73. № 3. P. 61–66.
36. *Wiest P.* Considerations relatives aux procédés à vitesse de coupe croissante pour apprécier l'usinability / P. Wiest // *Rev. Metallurgie.* 1962. V. 59. № 1. P. 65–69.
37. *Wouter G.* Kurrzeitversuch für Drehen mit Hartmetallwerkzeugen / G. Wouter // *Microtechnik.* 1961. Bd. 15. № 3. S. 111–120.

Система резания, ее элементы

12.1. и структура

Целью обработки материалов резанием является получение на детали поверхности с заданными характеристиками качества. Достижение этого результата сопровождается упругой и пластической деформацией срезаемого слоя и обработанной поверхности и изнашиванием контактных площадок режущего инструмента. Эти процессы совершаются одновременно, тесно взаимосвязаны и образуют единую систему, которая называется *системой резания*.

С развитием системно-структурного подхода к изучению различных объектов и явлений появилась необходимость выработать общее понятие системы. Каждая система состоит из множества элементов, имеющих между собой реальные связи. Природа элементов может быть различной, они могут являться в частности процессами. Состояние системы в каждый момент характеризуется набором ряда переменных, а поведение системы — определенной последовательностью ее состояний во времени. Система обладает свойством относительной устойчивости, т.е. сохраняется только в определенных границах изменений ее переменных [3].

Системе присуще свойство внутренней целостности, которое характеризуется ее автономностью, т.е. относительной самостоятельностью поведения и существования. Вследствие относительной автономности любая система может рассматриваться как подсистема (или элемент) более широкой системы. Одновременно явления или объекты, рассматриваемые в рамках данной системы как нерасчлененное целое, при изолированном изучении могут рассматриваться как системы иного уровня. Материальные системы характеризуются разной степенью активности взаимодействия их подсистем. В любой системе возможна как взаимозависимость подсистем, так и независимость их относительно друг друга.

Системы изучаются путем целенаправленного изменения внешних воздействий на входе и анализа реакций на выходе. В системе резания, как правило, рассматриваются параметры на входе и выходе (табл. 12.1). Число параметров не ограничивается приведен-

ными в таблицах. Например, среди входных можно рассматривать состав естественной воздушной среды, а среди выходных — стружколомание и стружкозавивание, сохранность кромок детали и др.

Таблица 12.1

Параметры системы резания

На входе		На выходе		
Элемент	Показатель	Элемент	Показатель	
Станок	Тип, модель	Точность обработки	Квалитет	
	Мощность		Размеры поля допуска	
	Жесткость		Шероховатость	
Приспособление	Тип, схема	Качество поверхности	Степень и глубина наклепа	
	Жесткость		Остаточные напряжения	
Инструмент	Материал режущей части	Период стойкости инструмента	Прижоги и микротрещины	
	Конструкция		Интенсивность изнашивания	
	Геометрия		Критерий затупления	
	Прочность и жесткость		Время работы	
Деталь	Свойства материала	Прочность инструмента	Допустимая сила резания	
	Размеры и форма		Предел выносливости материала	
	Припуск		Количество деталей, обработанных в единицу времени	
Режим резания	Скорость резания	Производительность	Площадь поверхности, обработанной в единицу времени	
	Подача		Экономичность	Себестоимость обработки
	Глубина резания			
Технологическая среда	Состав			
	Способ подачи			

Поскольку в настоящее время реальное физическое содержание механизмов, через которые переменные факторы состояния влияют на параметры функционирования, до конца не выявлено, связь между первыми и вторыми можно рассматривать как «черный ящик», параметры которого определяются совокупным действием

кинематики процесса резания и физических явлений, вызванных этим процессом. Рассмотрим механизм функционирования системы резания более подробно.

Система резания представляет собой необходимую для обработки данной заготовки регулируемую технологическую систему, т.е. совокупность станка, инструментов, приспособлений, технологической среды, с одной стороны, и процесса резания — с другой. Процесс резания можно рассматривать как механизм системы регулирования, связывающий технологическую систему и получающиеся в результате обработки технологические параметры детали.

Связи между элементами процесса резания делаются на одно- и двусторонние, когда оба элемента влияют друг на друга. В этом случае прямое воздействие первого элемента на второй вызывает обратное воздействие, которое может ослабить прямое или резко усилить его. Связи могут быть непосредственными или косвенными, действующими посредством изменения ряда других закономерностей, объединяющих два исследуемых параметра. Например, непосредственное влияние предварительного нагрева материала детали на период стойкости инструмента связано со снижением механических характеристик этого материала. Однако нагретый срезаемый слой изменяет характер распределения температур в зоне стружкообразования, и, как следствие, изменяются закономерности трения, наростообразования и т.д.

Взаимосвязь параметров процесса резания достаточно сложная. Например, долговечность инструмента, которая характеризуется его периодом стойкости и прочностью, определяется совместным действием таких параметров, как напряженное состояние в зоне резания, пластические деформации, трение, сила резания, тепловые явления.

Развернутая схема взаимосвязей в системе резания с учетом взаимодействия основных составляющих, которые характеризуют процесс резания, показана на рис. 12.1. Рассмотрим некоторые из этих составляющих.

К и н е м а т и к а процесса резания — это закономерности относительного движения инструмента и заготовки без учета физических явлений, протекающих в зоне резания. При этом технологическая станочная система считается абсолютно жесткой и не зависящей от каких-либо физико-химических воздействий. Изучение и анализ кинематики резания имеет большое значение, поскольку при определенном соотношении скоростей абсолютных движений, которые совершаются при резании, кинематика опреде-

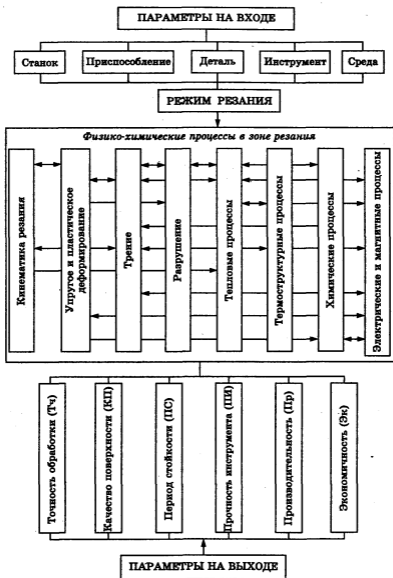


Рис. 12.1. Схема взаимосвязей в системе резания

ляет траекторию рабочего движения инструмента относительно детали.

Траектория рабочего движения совместно с геометрическими параметрами инструмента и скоростями абсолютных движений влияет на процесс стружкообразования, характер и интенсивность изнашивания и период стойкости инструмента. Кроме того, совокупность траекторий точек режущей кромки инструмента в процессе рабочего движения представляет собой поверхность резания, возникающую в процессе обработки, т.е. кинематика определяет форму поверхности резания и, как следствие, — геометрию обработанной поверхности.

Упругое и пластическое деформирование срезаемого слоя является одним из основных параметров процесса резания. Совместно с трением оно обуславливает возникновение напряжений и деформаций в режущем лезвии, стружке и поверхностном слое детали, определяет уровень сил и работу резания (подробно см. гл. 3-5).

Важным явлением процесса резания является разрушение. Оно характерно для процесса стружкообразования и определяет характер работы режущего инструмента. При стружкообразовании разрушение может быть как основным, так и сопутствующим показателем. Основным оно будет при резании хрупких материалов, когда под воздействием передней поверхности инструмента непосредственно у режущей кромки образуется система трещин, развивается опережающая магистральная трещина и отделяется элемент стружки. При резании пластичных материалов разрушение происходит только после значительных упругих и пластических деформаций. Интенсивность их протекания зависит от схемы напряженного состояния, тепловых, химических и электромагнитных процессов и является основным параметром стружкообразования.

Как уже отмечалось, тепловые процессы, сопровождающие процесс резания, — одни из наиболее важных в физико-химическом механизме этого процесса. Они определяют закономерности превращений энергии в различных процессах, сопровождающихся поглощением и выделением теплоты. Наиболее существенно при этом преобразование механической энергии в тепловую, вызывающее изменение температуры резания. Температурой резания устанавливается связь между химическим, структурным строением и физико-химическими свойствами исходного материала заготовки, с одной стороны, и стружки и поверхностного слоя обработанной детали — с другой.

Термоструктурные процессы вызывают изменение строения и физико-химических свойств обрабатываемого материала под действием сил и температур, возникающих при обработке. Наиболее интенсивно они протекают при энергонапряженных видах обработки, например шлифовании, лезвийной обработке с высокими скоростями резания и т.д. При этом под воздействием высоких температур изменяется микроструктура поверхностного слоя, возникают значительные остаточные напряжения, микротрещины, изменяется дислокационная структура материала. Термоструктурные изменения физико-механических свойств обрабатываемого материала, в свою очередь, оказывают обратное воздействие на тепловые и влияют на электрические и магнитные процессы в зоне резания. Так, на изменения в микроструктуре затрачивается значительное количество теплоты и, как следствие, стабилизируется уровень температур в зоне резания, несмотря на возрастание, например, скорости резания. Различия в микроструктурах материала влияют на его удельное электросопротивление, магнитную проницаемость, коэрцитивную силу и другие электромагнитные свойства.

Химические процессы протекают вследствие возникновения на контактных площадках химически чистых (ювенильных) поверхностей, которые находятся в активном состоянии и существенно влияют на процесс резания. Одна из причин этого — образование оксидных пленок, которые существенно снижают коэффициенты трения на контактных площадках, изменяют условия наростообразования и ряд других параметров процесса резания. Такой процесс, как диффузия, в значительной степени определяет интенсивность изнашивания и уровень стойкости режущего инструмента. Широкий диапазон химических процессов наблюдается в результате использования технологических сред. При этом изменяются как параметры процесса резания, так и эксплуатационные свойства поверхностного слоя детали. Интенсивность химических процессов в значительной степени связана с уровнем температур в зоне резания.

Электрические и магнитные процессы обусловлены несколькими процессами, среди которых интенсивный нагрев зоны контакта и образование термоЭДС в замкнутой цепи статор — приспособление — инструмент — деталь, возникновение ЭДС самоиндукции, поперечный термомагнитный эффект и др.

Таким образом, независимо от метода обработки качество системы резания определяется ее механическими, тепловыми, электрическими, магнитными, химическими и другими свойствами. В со-

ответствии с этим систему резания можно разделить на ряд частных подсистем: механическую, тепловую и т.д. Все они являются замкнутыми, т.е. выход последнего элемента связан со входом в первый. Закономерности функционирования таких систем рассматривает теория автоматического регулирования.

12.2. Процесс резания с позиций теории автоматического регулирования

Цель оптимизации процесса резания заключается в обеспечении определенной функциональной зависимости между его переменными параметрами. Процесс резания характеризуется большим количеством первичных и вторичных параметров и всегда протекает нестабильно вследствие изменения припуска и физико-механических свойств обрабатываемого материала, изнашивания инструмента, деформаций в технологической системе и других факторов. Поэтому только применение систем автоматического регулирования обеспечивает оптимальные условия в течение всего периода обработки.

В теории автоматического регулирования различают разомкнутые и замкнутые системы. Если изменение выходной величины не вызывает каких-либо изменений входной, система называется *разомкнутой*. Системы, характеризующиеся замкнутым циклом передачи воздействий, называются *замкнутыми*.

Передача воздействия выходного элемента на входной осуществляется с помощью обратной связи. Если в системе действует одна такая связь, система называется *одноконтурной*, если несколько, — *многоконтурной*.

Обработка резанием относится к объектам многоконтурного регулирования, поскольку имеет большое число регулируемых параметров, изменение каждого из которых вызывает изменение других. Однако для изучения свойств отдельных элементов, прежде всего процесса резания, систему условно можно считать разомкнутой. В этом случае, разорвав две связи, определяющие взаимодействие данного элемента с другими, можно рассмотреть его свойства отдельно, путем установления зависимости между параметрами на входе и выходе системы [8].

Структурная схема системы резания (см. рис. 12.1) представляет собой разомкнутую систему, так как управляющее воздействие на процесс резания и вторичные параметры оказывается только со

стороны первичных параметров. Объектом регулирования по этой схеме являются все первичные параметры, каждый из которых может быть использован для оптимизации процесса резания. Однако в качестве регулятора в первую очередь, используют изменение режимов резания. Регулирование процесса обработки в этом случае заключается в том, чтобы, исходя из знания параметров детали, метода обработки, схемы резания и технологической среды, путем изменения режима резания получить необходимые показатели функционирования системы. Тогда схему механической обработки, приведенную на рис. 12.1, можно трансформировать в другую (рис. 12.2), в которой из параметров на входе технологической системы выделены в качестве регулятора элементы режима резания.

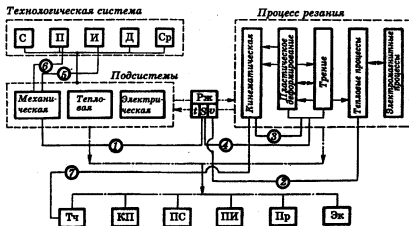


Рис. 12.2. Структурная схема автоматической системы управления процессом резания

Взаимодействие регулятора и основной системы позволяет рассмотреть замкнутую систему процесс резания — технологическая система. В эту систему введены «искусственные» обратные связи 1–7.

Цепь воздействия автоматической системы управления можно разделить на две части — внутреннюю и внешнюю по отношению к процессу резания. На рис. 12.2 видно, что внутренние воздействия характеризуются связями, показывающими воздействие одного физического явления на другое. Технологическая система и режим резания оказывают на процесс резания внешнее воздействие. При этом технологическую систему можно рассматривать как ряд подсистем.

Механическую подсистему изучают в кинематике, статике и динамике. Кинематику исследуют, анализируя перемещения в пространстве подвижных элементов, входящих в систему (шпинделя, заготовки, инструмента) вне связи с силами, определяющими движение. При рассмотрении статики подсистемы решают задачу равновесия действующих на нее сил. Динамика подсистемы характеризует закономерности движения, т.е. перемещения одних элементов относительно других в зависимости от действующих на них сил.

Тепловая подсистема характеризуется взаимосвязью ее деформаций и возникающих в процессе резания температурных полей. Температурные деформации станка вызваны нагревом станины и корпусных деталей в результате потерь на трение в механизмах, гидро- и электроприводах. Большое количество теплоты сообщается станку через СОЖ, отводящую ее из зоны резания, вследствие чего наблюдается смещение положения шпинделя, искривление станины.

Тепловая подсистема при обработке резанием описывается тремя основными уравнениями. Первым уравнением определяется равенство затрачиваемой на резание механической энергии W и выделяемой теплоты Q :

$$W = Q \approx P_2 v,$$

где P_2 — главная сила резания; v — скорость резания.

Второе уравнение устанавливает тепловой баланс системы инструмент — деталь в зоне стружкообразования:

$$W_{\text{деф}} + W_{\text{т.п.п}} + W_{\text{т.с.п}} = Q_c + Q_n + Q_d + Q_{\text{о.с.}}$$

Характеристика величин, входящих в приведенное уравнение, и их соотношения подробно рассмотрены в гл. 6.

Третьим уравнением описывается теплопроводность технологической системы:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = \frac{1}{c\rho} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(\Theta) \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(\Theta) \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(\Theta) \frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2} \right] \right\} + v_x \frac{\partial \Theta}{\partial x} + v_y \frac{\partial \Theta}{\partial y} + v_z \frac{\partial \Theta}{\partial z},$$

где τ — время; c — теплоемкость обрабатываемого материала; ρ — его плотность; x, y, z — координаты точки системы, в которой определяется температура теплового импульса; $\lambda(\Theta)$ — коэффициент теплопроводности; v — скорость перемещения источника теплоты.

Электрическая подсистема, которая характеризуется внешней цепью термотоков, рассмотрена в параграфе 14.6.

В настоящее время возможно использование различных вариантов процессов управления системой резания.

Под процессом управления системой понимается организация действий различных ее компонентов с целью достижения требуемых точности, шероховатости и производительности обработки. Возможны следующие системы управления (рис. 12.3): информационная, автоматизированная и автоматическая [8].

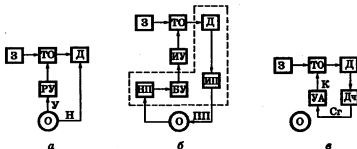


Рис. 12.3. Схемы систем управления процессом резания:

- a* — информационной; *б* — автоматизированной; *в* — автоматической;
 З — заготовка; ТО — технологическая операция; Д — деталь;
 РУ — рукоятка управления; О — оператор; У — управление;
 Н — наблюдение; ИУ — исполнительное устройство; НИ — наладочная программа; БУ — блок управления; ИП — измерительный прибор;
 ШП — подналадочная подсистема; УА — управляющий автомат;
 Дч — датчик; К — команды; Сг — сигналы

В информационной системе управления станочник наблюдает за качеством деталей и состоянием технологической системы, анализирует свои наблюдения, обдумывает целесообразность внесения каких-либо изменений в ход обработки и осуществляет их путем воздействия на органы управления. В частности, станочник устанавливает оптимальные режимы резания и производит настройку и поднастройку станка.

В автоматизированной системе управления качество заготовок, состояние системы, параметры процесса и детали контролируются приборами. Оператор в этом случае воздействует на процесс резания и обрабатываемую систему с помощью специальных механизмов и устройств. Основой деятельности станоч-

ника в этой системе является сопоставление показаний приборов с имеющимися нормативами и в случае их несоответствия — принятие решений, предусмотренных технологическими инструкциями.

В автоматической системе управления воздействие на процесс резания и технологическую систему производится также с помощью специальных устройств, но анализ показаний приборов и принятие решений осуществляет электронная система без участия оператора. К наиболее широко применяемым автоматическим (адаптивным) системам управления относятся: стабилизирующие контролируемые параметры (сила, температура, точность, шероховатость); компенсирующие те или иные погрешности (например, износ инструмента); оптимизирующие режимы обработки (подробнее см. в § 12.3).

Адаптивные системы управления создаются для обработки определенных деталей из конкретных материалов. При изменении условий обработки требуется вносить изменения в электронную систему управления, иногда достаточно сложные. Это затрудняет использование таких систем в единичном и мелкосерийном производстве.

В настоящее время более широкое распространение, чем адаптивное, получили гибридные системы, управляемые с помощью микропроцессорной техники или ЭВМ. Такие системы могут функционировать в автоматическом режиме, обладая свойством автоматизированной переналадки при обработке деталей произвольной номенклатуры. Основной составляющей такой системы является гибкий производственный модуль. Это станок с числовым программным управлением (ЧПУ), оснащенный автоматизированными устройствами для выполнения требуемых технологических операций, загрузки заготовок, снятия детали и отвода стружки, смены инструмента, измерений и контроля, диагностики отказов компонентов модуля в работе. Перспективным направлением является встраивание в гибкие модули систем адаптивного управления технологическим процессом.

Процесс резания на станках с ЧПУ и адаптивным управлением в значительной степени отличается от стационарного процесса, реализуемого на станках с ручным управлением.

12.3. Система резания при обработке на станках с ЧПУ и адаптивным управлением

В течение многих лет при исследовании процессов резания предполагалось, что при снятии слоя металла с заготовки условия обработки и свойства металла неизменны, т.е. процесс стационарный. Такой подход, однако, не позволяет объяснить ряд явлений, происходящих при стружкообразовании и формировании поверхностного слоя, и в первую очередь на современном автоматизированном оборудовании. Для его функционирования характерны нестационарные процессы резания, в которых за счет изменения условий резания существенно изменяется результативность обработки — производительность, период стойкости инструмента, точность, качество поверхности детали и т.д.

Нестационарные процессы резания встречаются при обработке деталей на станках с адаптивным управлением, с ЧПУ, на многоцелевых станках, в том числе оснащенных микропроцессорами.

Обработка деталей на станках гибкого производства осуществляется с переменными режимами резания. Нестационарность режима резания может быть обусловлена переменными скоростями главного движения v и движения подачи v_s , изменением по мере обработки глубины резания t или рабочих углов резания [7, 9].

При обработке криволинейного участка детали на станке с ЧПУ резец перемещается по криволинейной траектории. Направление движения подачи непрерывно изменяется, главный угол в плане ϕ уменьшается, а вспомогательный — увеличивается (рис. 12.4). При уменьшении угла ϕ ширина среза возрастает, а толщина уменьшается, хотя номинальная площадь среза (на рисунке заштрихована) остается постоянной: $f = St = ab$. Характер изменения легко оценить по табл. 12.2.

Поскольку влияние a и b на главную составляющую силы резания описывается зависимостью $P_z = C_p a^{0,75} b$, при перемещении резца по криволинейной траектории наблюдается изменение уровня сил резания.

Изменение углов в плане влияет также на шероховатость обработанной поверхности. Изменение высоты микронеровностей на криволинейном профиле наблюдается при обработке острозаточенным резцом и при участии в работе одновременно прямолинейной и радиусной режущих кромок.

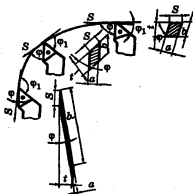


Рис. 12.4. Углы в плане и сечения среза при обработке криволинейного участка детали

Таблица 12.2

Влияние главного угла в плане φ на параметры процесса резания
($S = 2 \text{ мм/об}$; $t = 2 \text{ мм}$; $\varepsilon = 70^\circ$; $\gamma = 10^\circ$)

φ , град	a , мм	b , мм	b/a	P_x , Н	P_y , Н	P_z , Н	P_r , град	γ_x	
								при $\lambda = 10^\circ$	при $\lambda = -10^\circ$
110	1,88	1,13	1,13	3 420	1270	1 160	56		
90	2,00	2,00	1,00	3 360	1340	1 010	54	2	14
80	1,96	1,04	1,04	3 380	1320	1 060	55		
70	1,88	2,13	1,13	3 420	1270	1 160	56		
55	1,64	2,44	1,49	3 540	1040	1 430	62	4	13
40	1,28	3,13	2,44	3 770	680	1 760	70		
30	1,00	4,00	4,00	4 000	360	1 970	77		
20	0,68	5,88	8,65	7 830	120	3 910	84		
10	0,34	11,76	34,59	20 300	-500	10 050	88		
5	0,18	22,22	123,44	34 530	-1380	17 210	89	10	10

Изменение углов в плане оказывает влияние на направление схода стружки, которое перпендикулярно к диагонали сечения среза (рис. 12.5). Угол движения стружки ρ зависит от углов φ и φ_1 и отношения b/a . При больших значениях b/a стружка сходит примерно перпендикулярно к главной режущей кромке, а при малых

значениях b/a — к вспомогательной. От угла движения стружки зависит величина действительного переднего угла реза, а также соотношение составляющих сил резания P_x и P_y (см. табл. 12.2). В этом случае нестационарный режим резания определяется текущими значениями скорости резания v_t , подачи S_t , глубины резания t_t , а также ускорением главного движения резания \dot{v}_t , ускорением движения подачи \dot{S}_t и скоростью изменения глубины резания \dot{t}_t . В зависимости от характера изменения скорости резания, подачи и глубины значения \dot{v}_t , \dot{S}_t и \dot{t}_t могут быть положительными или отрицательными.

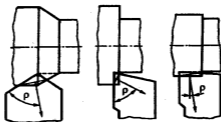


Рис. 12.5. Направления схода стружки для различных соотношений b/a

Резание с переменной подачей ведет к изменению толщины a среза. При переменной глубине изменяется ширина b среза. Поэтому можно дополнительно ввести \dot{a} и \dot{b} . Вследствие изменения направления векторов \vec{v} и \vec{v}_S происходит изменение положения координатных плоскостей (основной и резания) и рабочих углов резания. Нестационарный процесс резания характеризуется не только углами заточки инструмента ($\alpha, \gamma, \phi, \dots$), но и текущими значениями углов резания ($\alpha_t, \gamma_t, \phi_t, \dots$), скоростями их изменения ($\dot{\alpha}_t, \dot{\gamma}_t, \dot{\phi}_t, \dots$).

Рассмотрим основные особенности и закономерности двух основных видов нестационарного резания — с переменной скоростью резания и с переменной подачей [2, 5].

Зависимость $P_z = f(v)$, полученная для обычного резания, в зоне наростообразования имеет падающую и возрастающую ветви. Для нестационарного режима резания с *принудительным изменением скорости* эту зависимость можно разделить на два участка (рис. 12.6, а). Первый охватывает диапазон скоростей до 80 м/мин и характеризуется четко выраженным снижением силы резания, второй соответствует скоростям более 80 м/мин. Сила резания изменяется незначительно, имея тенденцию к уменьшению с возрастанием скорости.

танием скорости. Знак ускорения в целом не оказывает влияния на характер зависимости $P_z = f(v)$, однако при отрицательных ускорениях изменение силы происходит более равномерно и устойчиво. Силы при нестационарном режиме резания в диапазоне скоростей 30...70 м/мин на 15...20 % выше, чем при постоянном. При более высоких скоростях резания значения сил постепенно сближаются.

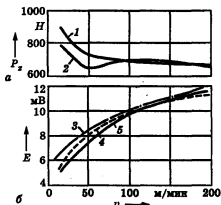


Рис. 12.6. Силы резания и термоЭДС при стационарном и нестационарном резании:

1, 4 — положительное ускорение; 3 — отрицательное;
2, 5 — стационарный процесс

Возрастание силы резания обусловлено приращением глубины резания при нестационарном режиме за счет увеличения высоты нароста.

Температурные зависимости $\Theta = f(v)$ и $E = f(v)$ для стационарного и нестационарного режимов резания по характеру примерно одинаковы (рис. 12.6, б), однако в том же диапазоне, что и для силы резания, имеются различия температур. При этом наблюдаются следующие закономерности:

- одинаковым скоростям резания при нестационарном режиме соответствуют более высокие температуры, чем при стационарном;
- при положительных ускорениях температуры меньше, чем при отрицательных;
- разность температур возрастает с уменьшением скорости резания.

Изменение температуры является определяющим фактором для интенсивности изнашивания режущих инструментов. При обработке деталей с переменной скоростью резания на станках с ЧПУ период стойкости будет несколько ниже нормативного, причем это снижение будет менее заметно при высоких скоростях резания. Такие скорости, следовательно, являются предпочтительными.

Другим видом нестационарного резания, используемого при обработке на станках с ЧПУ, является *резание с переменной подачей*. Повышение производительности и точности обработки можно обеспечить путем изменения подачи как функции длины обработки или поддержания подачи на оборот в условиях бесступенчатого регулирования частоты вращения шпинделя. Можно также обеспечить кинематическое стружколомение за счет прерывания подачи или ее модулированного изменения.

Повышение производительности и точности возможно при обработке канавок фасонного профиля, торцовых и конических поверхностей, фасок и т.д. Например, при точении канавок фасонного профиля с постоянной подачей последняя ограничивается площадью сечения среза в конце врезания резца в заготовку. Вследствие этого на всем пути врезания возможности станка и инструмента используются не полностью, поскольку площадь срезаемого слоя, сила и мощность резания возрастают по мере врезания резца в заготовку. Этот недостаток можно устранить изменением подачи в функции пути по закономерностям, обеспечивающим стабилизацию площади среза, силы или мощности.

Оптимальная по себестоимости обработка требует поддержания скорости резания на постоянном уровне, поэтому при обработке торцов деталей целесообразно регулировать частоту вращения шпинделя в соответствии с изменением диаметра обработанной поверхности. Так как подача на оборот при этом должна оставаться постоянной, необходимо обеспечить плавное изменение минутной подачи в функции пути в соответствии с изменением частоты вращения шпинделя.

Указанные выше закономерности изменения подачи можно представить в виде зависимости $K_S = f(L_r)$, где $K_S = S_r/S_{\min}$ — коэффициент изменения подачи по длине рабочего хода; S_r — текущая подача; S_{\min} — минимальная; L_r — текущая длина рабочего хода (в процентах от его общей длины).

На рис. 12.7 приведены закономерности изменения подачи при обработке торцовых поверхностей и фасок (кривая 4), канавок фасонного профиля (кривая 2), литейных и штамповочных уклонов

(кривые 1 и 3 соответственно), а также при обработке деталей из чугуна и других хрупких материалов с целью предотвращения выкрашивания кромок деталей на выходе резца [2].

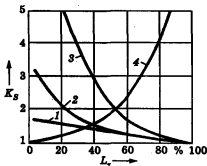


Рис. 12.7. Закономерности изменения подачи по длине рабочего хода

На станках с ЧПУ изменение подачи происходит следующим образом. В соответствии с программой обеспечивается участие резца в двух движениях: переносном равномерном движении S_0 и относительном движении с подачей ΔS_0 , которое подчиняется закону релаксационных колебаний. В итоге режущая кромка совершает постепенное врезание и быстрый отвод. В зависимости от соотношения S_0 и ΔS_0 можно реализовать условия вибрационного, дискретного или прерывистого резания (в последнем случае резец периодически выходит из контакта с деталью).

Обработка резанием с осевыми вибрациями на станках с ЧПУ сводится к модулированному изменению подачи, которая плавно увеличивается, затем плавно уменьшается до первоначальной. При модулировании подачи условия охлаждения инструмента лучше, появляется возможность управления процессом образования стружки и ее отвода из зоны резания. Однако в первую очередь применение модулированного изменения подачи способствует гашению автоколебаний, так как при этом повышается виброустойчивость технологической системы. Установлено [6], что автоколебания гасятся при воздействии на систему асинхронной силы с амплитудой

$$P_{\text{осц}} = 0,707a_0(\omega^2 - f^2)m,$$

где a_0 — амплитуда автоколебаний системы; ω — частота автоколебаний; f — частота осциллирующего движения подачи; m — приведенная масса системы.

Дискретный метод обработки заключается в периодической остановке реза на время, достаточное для прерывания процесса резания. Установлено, что при прерывистом резании снижаются коэффициенты трения на передней и задней поверхностях реза, а также температура в зоне резания. Вследствие этого относительный износ резов при дискретном точении в 1,3–1,5 раза меньше, чем при непрерывном, причем в этом случае подтверждается положение об оптимальной температуре резания.

Процесс резания с переменной подачей сопровождается рядом физических явлений, существенно отличающих его от обычного резания. При точении с переменной подачей в широких пределах изменяются элементы сечения срезаемого слоя, скорость резания, кинематические углы реза. Это определяет условия пластического деформирования в зоне резания, приводит к изменению скоростей сдвига и размеров зоны стружкообразования, вследствие чего изменяются размеры площадок контакта и условия трения на них, что сказывается на силах и температурах резания, стойкости инструмента и шероховатости обработанной поверхности.

Установлено, что при изменении S от наибольшего значения к наименьшему сила резания выше, чем при изменении S в обратном направлении, особенно при $S < 0,2$ мм/об. Это явление объясняется тем, что при точении глубина наклепа обычно в 1,5–2 раза превышает толщину среза, причем степень наклепа в более глубоких слоях снижается. При уменьшении подачи режущая кромка плавно переходит в более наклепанные слои; при этом увеличиваются контактные напряжения на передней поверхности и, как следствие, растет сила резания. С ростом толщины среза наблюдается обратная зависимость. Наряду с этим на силы резания влияют изменение кинематики процесса, периодическое изменение толщины среза. При резании с модулированной подачей фактическая толщина среза определяется относительным положением поверхностей резания на предыдущем и последующих оборотах детали, т.е. зависит от параметров изменения S и n . При определенном их соотношении можно добиться того, что большая толщина среза будет совпадать с большим кинематическим передним углом, а малая — с меньшим.

Большему переднему углу соответствует увеличение угла сдвига, относительного сдвига, меньший коэффициент трения. В результате можно обеспечить снижение средней силы резания по сравнению с обычной на 10...20 % (рис. 12.8), причем оно тем значительнее, чем выше частота модулирования подачи [2].

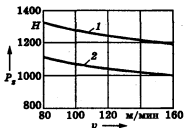


Рис. 12.8. Силы резания при точении с подачей:
1 — постоянной; 2 — модулированной

Температура резания зависит от характера изменения подачи так же, как и сила резания, уменьшаясь в случае использования модулированной подачи на 15...20 %. Период стойкости резцов при этом возрастает на 30...35 %.

Зафиксированы также изменения шероховатости обработанной поверхности, особенно в зоне малых подач и при малых углах ϕ_1 . В этом случае происходит сближение вершины вновь образовавшегося гребешка с вершиной предыдущего, и резец вспомогательной режущей кромкой частично срезает его (рис. 12.9). Уменьшению высоты микронеровностей способствует также частичная работа резца по предварительно наклепанному слою.

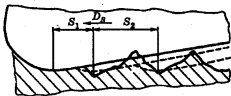


Рис. 12.9. Подрезание остаточных гребешков микронеровностей на обработанной поверхности

Сравнивая варианты работы станков с ЧПУ с переменной скоростью и переменной подачей, следует отметить преимущества второго метода с точки зрения закономерностей процесса резания.

Способ механической обработки, обеспечивающий оптимизацию процесса за счет изменения условий обработки, в первую очередь режимов резания, в зависимости от конкретных условий реза-

ния в каждой точке заготовки называют *адаптивным резанием*. Адаптивные системы перерабатывают информацию о принятом для регулирования критерии, например силе или температуре, и обеспечивают нестационарное резание. Они позволяют значительно (иногда в несколько раз) повышать точность и качество обработанной поверхности. Основным фактором, влияющим на эти показатели обработки, — колебание силы резания, вызывающее изменение упругих перемещений в технологической системе. Наибольшее влияние на перемещение Δ оказывает составляющая P_y силы резания. Действие составляющих P_y и P_z приводит к его увеличению, а действие P_x — к уменьшению.

На рис. 12.10 представлены графики зависимости составляющих P_z , P_y и P_x от t и S , полученные экспериментальным путем при точении на гидрокопировальном полуавтомате резцами, оснащенными трехгранными неперегачиваемыми пластинами, имеющими $\varphi = 90^\circ$, $\gamma = 12^\circ$, $\alpha = 7^\circ 30'$, $r_n = 1$ мм. Из рисунка видно, что с увеличением глубины резания составляющие P_z и P_x монотонно возрастают. На малых подачах соотношение P_x/P_z практически не зависит от t , но на больших подачах с возрастанием глубины резания это соотношение увеличивается [2].

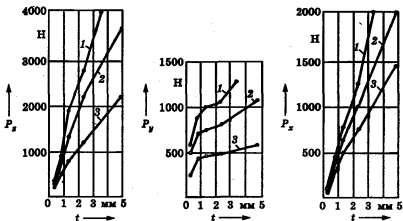


Рис. 12.10. Влияние глубины резания на составляющие силы резания:
1 — $S = 0,8$ мм/об; 2 — $S = 0,4$ мм/об; 3 — $S = 0,15$ мм/об

Иной характер имеет изменение радиальной составляющей P_y . При увеличении глубины резания от 0 до $t = 1$ мм она резко возрастает.

тает и превышает соответствующие значения P_z и P_x . При дальнейшем увеличении глубины резания рост составляющей P_y значительно уменьшается, наблюдается переход к соотношениям $P_y < P_z$, $P_y < P_x$. Резкое возрастание P_y на малых глубинах характерно для резания с использованием многогранных пластин, поскольку при $t \leq r_s$ наблюдается относительное преобладание силы N_s , действующей по нормали к вспомогательной режущей кромке. При $t > r_s$ возрастает роль активной части главной режущей кромки, вследствие чего увеличивается действующая нормально к ней сила N_r и сила P_x (рис. 12.11).

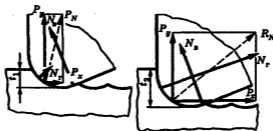


Рис. 12.11. Схема действия составляющих P_y и P_x при изменении глубины резания

Если в адаптивной системе, обеспечивающей постоянство упругих перемещений путем регулирования продольной подачи S , управление осуществлять по одной из составляющих и стабилизировать ее, то остальные составляющие будут изменяться (рис. 12.12). Анализ графиков показывает, что при управлении путем регулирования подачи изменение вектора силы резания с изменением t будет значительно меньше, чем при обычной обработке. Это можно оценить по следующим зависимостям [1]:

стационарное резание:

$$P_z = 2940tS^{0,75}v^{-0,15}; P_y = 2130t^{0,9}S^{0,6}v^{-0,3}; P_x = 4750t^{0,5}S^{0,5}v^{-0,4};$$

регулирование подачи при $P_z = \text{const}$:

$$P_y = 228t^{0,1}v^{-0,18}P_z^{0,8}; P_x = 106t^{0,33}v^{-0,3}P_z^{0,67};$$

регулирование подачи при $P_y = \text{const}$:

$$P_z = 3t^{-0,12}v^{0,23}P_y^{1,25}; P_x = 55,8t^{0,25}v^{-0,15}P_y^{0,83};$$

регулирование подачи при $P_x = \text{const}$:

$$P_x = 0,3t^{-0,5}v^{0,45}P_x^{1,5}; \quad P_y = 1,3t^{-0,3}v^{-0,18}P_x^{1,2}.$$

Анализируя приведенные зависимости, легко установить, что для обычной обработки при изменении t от 1 до 5 мм P_y/P_x колеблется от 0,75 до 0,26, а в случае адаптивного управления по P_x — от 0,37 до 0,42.

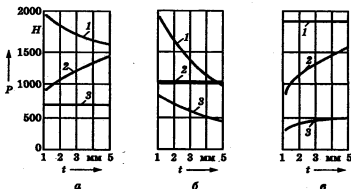


Рис. 12.12. Изменение составляющих P_x , P_y и P_z при стабилизации одной из них:

а — $P_y = \text{const}$; б — $P_x = \text{const}$; в — $P_z = \text{const}$; 1 — P_z ; 2 — P_x ; 3 — P_y

Для каждой технологической системы имеется определенная зависимость упругого перемещения Δ от глубины резания и подачи. Допустим, что во время обработки глубина резания изменилась с t_2 на t_1 . Тогда, согласно функции $\Delta = f(t, S)$ (рис. 12.13, а), для поддержания $\Delta = \text{const}$ надо изменить продольную подачу с S_2 на S_1 , чтобы вернуть упругое перемещение Δ_1 при t_1 и S_2 к заданному значению Δ_2 . Если функция $\Delta = f(t, S)$ имеет экстремумы, как это показано на рис. 12.13, б, то, изменяя продольную подачу до S_1 , получаем значение $\Delta_{1 \text{ max}}$, которое отличается от заданного (Δ_2). Дальнейшее увеличение подачи приведет к ухудшению результата.

Экстремумы зависимости $\Delta = f(t, S)$ объясняются тем, что различные составляющие силы резания часто вызывают различные по знаку упругие перемещения.

Адаптивные системы, позволяющие стабилизировать упругие перемещения, обычно однопараметрические. В качестве переменной используется подача, которая является вторым фактором по степени влияния ее на силу резания. Изменение глубины резания

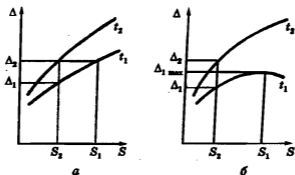


Рис. 12.13. Зависимость упругого перемещения технологической системы от глубины резания и подачи

неприемлемо, поскольку приводит к необходимости многопроходной обработки. Типовая схема управления упругими перемещениями путем изменения продольной подачи приведена на рис. 12.14. Динамометрический узел 1 во время фрезерования контролирует усилие на ходовом винте продольной подачи стола и в виде электрического сигнала подает его через усилитель 2 на блок сравнения 3, где он сопоставляется с эталонным сигналом от задатчика 4. Результаты сравнения выводятся на исполнительный механизм 5 системы управления, который будет изменять продольную подачу стола до тех пор, пока сигнал рассогласования не достигнет допустимой величины.

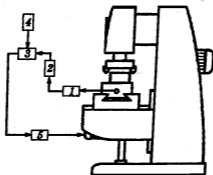


Рис. 12.14. Принципиальная схема адаптивной системы управления [1]

Точность и производительность обработки, особенно на чистовых операциях, зависят не только от силового фактора, но и от теп-

ловых деформаций. При этом нагрев элементов технологической системы вызывается теплотой:

- выделяющейся в процессе резания;
- выделяющейся в результате работы сил трения в механизмах станка;
- от гидро- и электроприводов;
- поступающей извне от работающего по соседству оборудования, из внешней среды и т.д.

Кроме того, существенное влияние на температурные деформации элементов технологической системы оказывают колебания припуска и твердости заготовок и затупление режущего инструмента, что приводит к изменению как силового, так и теплового режима обработки. Колебания температурных деформаций деталей и инструмента наиболее эффективно можно устранять за счет изменения одного или нескольких параметров режима резания. Так, например, стабилизация теплоты, идущей в обрабатываемую деталь, в наибольшей степени зависит от стабилизации главной составляющей силы резания P_z . Наиболее успешно это осуществляется путем изменения подачи в процессе обработки, а принципиальная схема адаптивного управления аналогична приведенной на рис. 12.14.

Адаптивные системы управления могут использоваться также для стабилизации шероховатости и наклепа обработанной поверхности. Известно, что существенное влияние на шероховатость обработанной поверхности оказывает подача на оборот детали S_0 . Однако в процессе адаптивного резания она изменяется вследствие колебаний припуска, твердости заготовки, затупления режущего инструмента, динамической жесткости технологической системы.

Особенно большое значение приобретает необходимость управления шероховатостью, когда в системах адаптивного управления в качестве регулирующего параметра используется подача или скорость резания. Например, в станках с гидравлическим приводом подачу, задавая определенным значением S_0 для обеспечения требуемой шероховатости поверхности, можно изменять минутную подачу в соответствии с закономерностью изменения частоты вращения шпинделя.

Известно, что наклеп поверхностного слоя определяется действием силового поля, нагревом обрабатываемой детали и структурными превращениями в ней. В процессе обработки эти показатели изменяются вследствие колебаний припуска и твердости заготовок, затупления инструмента, изменений его геометрии и кинематики резания и т.д.

Например, при увеличении усилий резания и степени пластических деформаций повышается степень наклепа, а увеличение времени воздействия силы на поверхностный слой увеличивает глубину наклепа. В зависимости от механических характеристик обрабатываемого материала возможно возникновение сжимающих (хрупкие металлы) или растягивающих (пластичные металлы) остаточных напряжений, которые пропорциональны подаче. Увеличение скорости резания сокращает время действия деформирующей силы на металл, уменьшая глубину наклепа, однако одновременно увеличивается выделение теплоты в зоне резания. Возрастание износа режущего инструмента также приводит к увеличению интенсивности силового и температурного режимов.

Таким образом, изменяя силовой и температурный режимы, можно управлять показателями наклепа поверхностного слоя. Наиболее

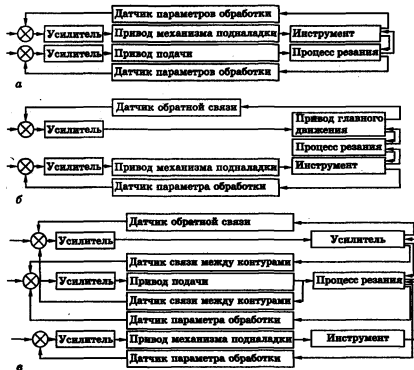


Рис. 12.15. Структурные схемы многопараметрических адаптивных систем: а — вариант P, a_n ; б — вариант P, v ; в — вариант P, a_n, Θ

широко такое управление осуществляется за счет изменения подачи или скорости резания. При этом целесообразно использовать многопараметрические системы. Они являются одним из наиболее совершенных средств управления процессом механической обработки и обеспечивают одновременное изменение параметров системы резания в зависимости от возмущающих воздействий, например динамических и тепловых. Практическое значение имеют 11 вариантов таких систем [4], которые в зависимости от количества подсистем регулирования делятся на двухконтурные ($P, a_n; P, v; P, \Theta; v, a_n; a_n, \Theta; v, \Theta$), трехконтурные ($P, a_n, v; P, \Theta, v; P, a_n, \Theta; a_n, v, \Theta$) и четырехконтурные (P, a_n, v, Θ). Здесь приняты следующие обозначения: P — подсистема стабилизации силовых параметров процесса резания; a_n — подсистема положения инструмента; v — подсистема скорости резания; Θ — подсистема температуры резания.

Структурные схемы многопараметрических систем показаны на рис. 12.15.

Литература

1. Адаптивное управление станками / Б.М. Базров [и др.]; Под ред. Б.С. Балакшина. М.: Машиностроение, 1973.
2. Каштальян И.А. Разработка и исследование методов повышения производительности и точности обработки на токарных станках с ЧПУ регулированием подачи: Дис. ... канд. техн. наук / И.А. Каштальян. Мн., 1982.
3. Клушин М.И. Теория резания. Вводные главы / М.И. Клушин. Горький: ГПИ, 1975.
4. Лецинский Л.Ю. Динамические характеристики автоматических станочных систем многовязанного регулирования / Л.Ю. Лецинский // Станки и инструмент. 1975. № 2. С. 4-7.
5. Подураев В.Н. Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания / В.Н. Подураев. М.: Машиностроение, 1977.
6. Подураев В.Н. Обработка резанием с вибрациями / В.Н. Подураев. М.: Машиностроение, 1970.
7. Подураев В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов / В.Н. Подураев. М.: Машиностроение, 1974.
8. Подураев В.Н. Технология физико-химических методов обработки / В.Н. Подураев. М.: Машиностроение, 1985.
9. Шарин Ю.С. Обработка деталей на станках с ЧПУ / Ю.С. Шарин. М.: Машиностроение, 1983.

Оптимальная геометрия режущих

13.1. инструментов

Понятие об оптимальной геометрии инструментов. На интенсивность изнашивания контактных площадок инструмента большое влияние оказывает форма его режущей части и величины углов заточки, т.е. его геометрические параметры. Изменение их влечет за собой изменение периода стойкости инструмента, сил резания, шероховатости обработанной поверхности и т.д.

В зависимости от цели, которую ставит перед собой исследователь или технолог (минимализация сил резания или шероховатости обработанной поверхности, обеспечение максимально возможных в данных условиях периода стойкости инструмента и производительности обработки и т.д.), используют различные сочетания углов заточки инструмента. На практике при совершенствовании геометрии инструмента стремятся обеспечить наибольший период его стойкости и допустимую скорость резания v_r . Обращают внимание и на обеспечение требуемых производительности обработки и качества обработанной поверхности. Возможны и другие направления оптимизации процесса обработки, когда решающую роль играет, например, шероховатость обработанной поверхности, а все другие показатели являются второстепенными. Сочетание геометрических параметров, обеспечивающее достижение цели оптимизации, в дальнейшем будем называть *оптимальной геометрией* (или наиболее выгодными геометрическими параметрами). При назначении оптимальных геометрических параметров инструмента следует помнить, что иногда целесообразно допускать отклонения от оптимальных величин углов на $2...3^\circ$, что позволяет уменьшать номенклатуру применяемых инструментов.

Выбор заднего угла α . Задний угол обеспечивает уменьшение трения задней поверхности режущего инструмента об обработанную поверхность. Поэтому с увеличением угла α до каких-то опре-

деленных пределов условия резания улучшаются. Однако увеличение α приводит к уменьшению угла заострения β , в результате чего ухудшаются условия теплоотвода и интенсифицируется изнашивание. Таким образом, с увеличением α стойкость вначале растет, а потом падает (рис. 13.1). Чтобы полнее выяснить характер изменения стойкости режущего инструмента с изменением заднего угла, необходимо учитывать толщину срезаемого слоя. Известно [1], что при обработке сталей больший оптимальный угол α соответствует меньшей толщине срезаемого слоя: $\sin \alpha_0 = 0,13/a^{0,3}$.

Для практических целей при обработке сталей рекомендуются следующие величины задних углов: $\alpha = 8^\circ$ для черновых резцов при $S > 0,3$ мм/об; $\alpha = 12^\circ$ для чистовых резцов при $S < 0,3$ мм/об; $\alpha = 12...15^\circ$ для торцовых и цилиндрических фрез. Величины задних углов при обработке чугунов несколько меньше, чем при обработке сталей.

Выбор переднего угла γ . Как известно, чем больше передний угол γ , тем легче протекает процесс резания, т.е. тем меньше силы и температура резания, деформация срезаемого слоя, а следовательно, выше период стойкости режущего инструмента. Однако следует учитывать, что с увеличением угла γ уменьшается угол заострения β , вследствие чего ухудшается отвод теплоты. Поэтому кривые $T = f(\gamma)$ имеют характер, аналогичный графику $T = f(\alpha)$ (рис. 13.2).

Передний угол должен быть тем больше, чем меньше твердость и прочность обрабатываемого материала и больше его пластичность. Для инструментов из быстрорежущей стали при обработке мягких сталей угол γ равен $20...30^\circ$, сталей средней твердости — $12...15^\circ$, чугуна — $5...15^\circ$, алюминия — $30...40^\circ$. У твердосплавного инструмента передний угол делается меньшим, а иногда даже отрицательным в силу того, что этот инструментальный материал

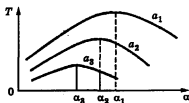


Рис. 13.1. Зависимость $T = f(\alpha)$ при различной толщине срезаемого слоя ($a_3 > a_2 > a_1$)

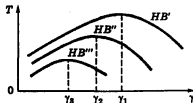


Рис. 13.2. Зависимость $T = f(\gamma)$ при различной твердости обрабатываемого материала ($HB' < HB'' < HB'''$)

менее прочный, чем быстрорежущая сталь. Однако уменьшение γ приводит к росту сил резания. Поэтому как в твердосплавных, так и в быстрорежущих инструментах широко используют положительно заточенную переднюю поверхность с отрицательной фаской вблизи режущей кромки (рис. 13.3). Фаска способствует повышению прочности режущей кромки, а положительный передний угол уменьшает уровень сил резания.

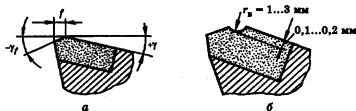


Рис. 13.3. Формы передней поверхности реза:
а — с отрицательной фаской; б — с отрицательной фаской и лункой

Значения γ , f и γ_f для твердосплавного инструмента равны 15° , $(1,0...1,5)S$ и -5° , а для быстрорежущего — 30° , $0,8S$ и 0° .

Для обеспечения завивания стружки при скоростном точении на передней поверхности лезвия делают уступы, порошки или мелкие лунки. Их можно выполнить при заточке, а для твердосплавных пластин — в процессе прессования. Примеры современного оформления передних поверхностей таких пластин приведены в табл. 13.1.

Выбор главного угла в плане ϕ . При постоянных значениях S и t изменение угла ϕ приводит к изменению ширины и толщины срезаемого слоя. Чем меньше ϕ , тем больше ширина среза b и угол ϵ и лучше отвод теплоты. Иными словами: малые углы ϕ способствуют увеличению периода стойкости инструмента (рис. 13.4, а).

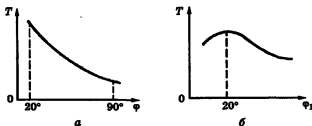
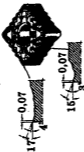
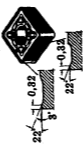

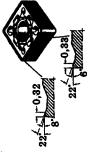
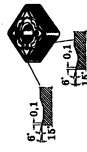



Рис. 13.4. Зависимость периода стойкости инструмента:
а — от главного угла в плане; б — от вспомогательного угла

Таблица 13.1
Геометрия токарных многогранных пластин фирмы «Sandvik Coromant».

Условия и особенности обработки	Группа твердых сплавов	Режимы резания*	Внешний вид и геометрия пластин
<p>Чистовое точение сталей:</p> <p>надежный отвод стружки при обработке резцами различного назначения</p> <p>малые силы резания</p> <p>высокое качество обработки</p>		<p>$t = 0,3 \dots 1,5$ мм</p> <p>$S = 0,1 \dots 0,4$ мм/об</p>	
<p>Черновое точение сталей:</p> <p>максимальная экономичность и производительность обработки</p> <p>стружкойлом, работающий в широком диапазоне режимов резания</p>	P	<p>$t = 1,0 \dots 7,0$ мм</p> <p>$S = 0,25 \dots 0,7$ мм/об</p>	
<p>Чистовое точение жаропрочных сталей и сплавов:</p> <p>малый риск образования нароста</p> <p>высокое качество обработки</p>	M	<p>$t = 0,5 \dots 4,0$ мм</p> <p>$S = 0,15 \dots 0,4$ мм/об</p>	

Окончание табл. 13.1

Условия и особенности обработки	Группа твердых сплавов	Режимы резания*	Внешний вид и геометрия пластины
<p>Черновое точение жаропрочных сталей и сплавов:</p> <p>стружколом, работающий в широком диапазоне режимов резания</p> <p>возможна обработка с ударом</p>	М	<p>$t = 1,5 \dots 8,0$ мм</p> <p>$S = 0,35 \dots 0,7$ мм/об</p>	
<p>Чистовое точение чугуна:</p> <p>малые силы резания</p> <p>обработка без задиров</p>	К	<p>$t = 0,15 \dots 2,0$ мм</p> <p>$S = 0,1 \dots 0,3$ мм/об</p>	
<p>Черновое точение чугуна:</p> <p>стабильная работа в максимально тяжелых условиях</p> <p>максимальная опорная поверхность</p>	К	<p>$t = 0,3 \dots 8,0$ мм</p> <p>$S = 0,2 \dots 0,8$ мм/об</p>	

* Для пластины с гранью длиной 12,7 мм.

Отсюда следует, что для увеличения периода стойкости инструмента надо стремиться к уменьшению угла ϕ . Однако чрезмерное его уменьшение оказывается вредным, так как при этом наблюдается резкое возрастание радиальной составляющей P_y силы резания и увеличение вибраций. При обработке нежестких деталей для уменьшения радиальной составляющей P_y главный угол в плане ϕ следует увеличивать до 90° . В отдельных случаях угол ϕ назначают из конструктивных соображений. Например, у метчиков для нарезания глухих резьб угол ϕ берется большим ($\phi = 40^\circ$), чем у метчиков для нарезания сквозных резьб ($\phi = 20^\circ$). Это позволяет нарезать резьбу в глухих отверстиях на большую длину. О влиянии угла ϕ на некоторые показатели процесса резания можно судить по табл. 13.2.

Таблица 13.2

Значения поправочных коэффициентов для учета влияния главного угла в плане

Параметр	Обрабатываемый материал	Главный угол в плане ϕ , град			
		45	60	75	90
P_x	Сталь	1	1,27	1,51	1,82
	Чугун	1	1,11	1,20	1,28
P_y	Сталь	1	0,71	0,54	0,44
	Чугун	1	0,87	0,77	0,70
P_z	Сталь	1	1,02	1,03	1,08
	Чугун	1	0,96	0,94	0,92
T	Сталь	1	0,84	0,72	0,66
	Чугун	1	0,88	0,79	0,73

Главный угол в плане влияет также на шероховатость обработанной поверхности, поэтому при чистовой обработке рекомендуется использовать меньшие значения ϕ .

Выбор вспомогательного угла в плане ϕ_1 . Выбор ϕ_1 преследует цель уменьшения трения вспомогательной задней поверхности инструмента об обработанную поверхность. Однако чем больше угол ϕ_1 , тем выше остаточные гребешки на обработанной поверхности. Кроме того, уменьшается угол при вершине ϵ , а следовательно, хуже отводится теплота. График зависимости стойкости реза от вспомогательного угла в плане $T = f(\phi_1)$ представлен на рис. 13.4, б. Для отдельных видов инструментов ϕ_1 колеблется в пределах от 0° до $2...3^\circ$. Например, у сверл и метчиков $\phi_1 = 2...3'$, а у отрезного реза $\phi_1 = 1...3^\circ$.

В ряде случаев на инструментах выполняют переходные режущие кромок. Они обеспечивают плавное сопряжение главной

и вспомогательной режущих кромок. При наличии переходной кромки уменьшается шероховатость обработанной поверхности и повышается период стойкости режущего инструмента. Переходная режущая кромка выполняется прямолинейной (рис. 13.5, а) или по радиусу $r_s = 0,5...2$ мм (рис. 13.5, б). Обычно у проходных резцов длина переходной кромки $l = 2...3$ мм.

Выбор угла наклона главной режущей кромки λ . При выборе угла λ необходимо учитывать следующее:

□ чем больше положительный угол λ , тем больше масса металла около вершины инструмента (рис. 13.6, а) и лучше отвод теплоты;



Рис. 13.5. Переходная прямолинейная (а) и радиусная (б) режущие кромки

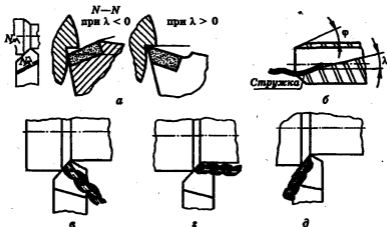


Рис. 13.6. К выбору угла наклона режущей кромки:
 а — резание с положительными и отрицательными углами λ ;
 б — направление схода стружки при нарезании резьбы метчиком с углом $+\lambda$; в, г, д — направление схода стружки при резании резцом соответственно с $\lambda = 0^\circ$, $\lambda > 0^\circ$, $\lambda < 0^\circ$

наряду с этим нужно учитывать, что положительные углы λ уменьшают передние углы, а это затрудняет работу резания;

□ при положительных углах λ лезвие инструмента оказывается более прочным, что важно для твердосплавных инструментов, особенно при работе их с ударами и пульсирующими нагрузками;

□ угол λ влияет на направление схода стружки и ее форму (рис. 13.6, б-д); например, при нарезании резьб метчиком можно направить стружку в отверстие или из отверстия (для глухих резьб).

С учетом вышесказанного рекомендуемые углы для чистовых и черновых резцов из быстрорежущей стали равны соответственно $\lambda = 0^\circ \dots (-4)^\circ$ и $\lambda = 5 \dots 10^\circ$, для твердосплавных резцов при работе их без ударов и с ударами — $\lambda = 5 \dots 10^\circ$ и $\lambda = 5 \dots 20^\circ$.

Критерии оптимальности режимов

13.2. резания

Наряду с выбором оптимальной геометрии инструмента важное значение имеет выбор оптимального режима резания (оптимальность оценивается различными критериями). Наиболее распространенные: максимальная производительность, наименьшая себестоимость операций, минимальные расходы на эксплуатацию режущего инструмента.

Показатель *наибольшей производительности оборудования* при определенных условиях обеспечивает достижение максимальной выработки рабочего. Он применяется, в частности, при ликвидации узких мест, когда экономия «живого» труда имеет наибольшее значение.

Производительность оборудования можно выразить количеством деталей, обработанных за единицу времени:

$$Q = \frac{1}{T_0 + T_{в.н} + T_{обс} + T_{от.л} + T_{п.з}}, \quad (13.1)$$

где T_0 — основное время обработки одной детали; $T_{в.н}$ — вспомогательное неперекрываемое время*, включающее время на установку и снятие детали, управление стянком, измерение детали непосредственно на станке; $T_{обс}$ — время технического и организационного

*Время, затрачиваемое до либо после основного времени.

обслуживания рабочего места; $T_{от.л}$ — время на отдых и личные надобности; $T_{п-з}$ — подготовительно-заключительное время, затраченное на подготовку к заданной работе (отнесенное к одной детали).

Изменение режимов резания оказывает влияние не только на основное время, но и на время обслуживания рабочего места; оно включает время на смену инструмента вследствие его затупления, на регулирование и подналадку станка и др. Зависит время обслуживания от интенсивности изнашивания инструмента и других параметров, непосредственно связанных с режимами резания.

Обозначив время смены затупленного инструмента и настройки на размер $\tau_{см}$, получим, что на одну деталь затрачивается

$$\tau'_{см} = \frac{\tau_{см}}{N} = \frac{\tau_{см}T_0}{T},$$

где N — количество деталей, обработанных за период стойкости T инструмента.

Подставив полученное выражение в формулу (13.1), получим:

$$Q = \frac{1}{T_0(1 + \tau_{см}/T) + \tau},$$

где τ — время на обработку детали, не связанное с режимами резания.

Основное время на обработку детали на токарном станке рассчитывается по формуле

$$T_0 = \frac{\pi D l_{р.х} h}{1000 v S t},$$

где D — диаметр обрабатываемой детали; $l_{р.х}$ — длина рабочего хода; h — снимаемый припуск; v — скорость резания; S — подача; t — глубина резания.

Все названные величины, кроме скорости резания, известны заранее, поэтому получаем выражение

$$T_0 = \frac{A}{v} = \frac{AT^m}{C_v} = CT^m,$$

где m — показатель относительной стойкости. Тогда

$$Q = \frac{1}{CT^m(1 + \tau_{см}/T) + \tau} = \frac{1}{CT^m + C\tau_{см}T^{m-1} + \tau}.$$

Взяв производную dQ/dT , после соответствующих преобразований получим период стойкости и скорость резания, обеспечивающие наибольшую производительность:

$$T_Q = \frac{(1-m)\tau_{cm}}{m}; \quad (13.2)$$

$$v_Q = \sqrt[m]{\frac{mC_T}{(m-1)\tau_{cm}}}.$$

Таким образом, скорость резания, обеспечивающая максимальную производительность, зависит от продолжительности смены и подналадки инструмента. В случае обработки деталей на универсальном оборудовании время смены инструмента, его настройки на размер и подналадки составляет до 5...6 мин [5]. В случае же использования гибких производственных систем настройка инструмента на размер осуществляется вне станка, параллельно с обработкой деталей. Само же время установки в магазине, а затем в шпинделе станка составляет от минуты до нескольких секунд.

Другой критерий оптимальности — это показатель *затрат на эксплуатацию инструмента*. Он используется в тех случаях, когда возникает необходимость экономии дефицитного режущего инструмента, замена которого по тем или иным причинам нежелательна. Этот критерий предполагает наличие минимума стоимости инструмента, отнесенной к одной детали.

Стоимость эксплуатации режущего инструмента, отнесенная к одной детали, $S_n = S_T/N = T_0 S_T/T$, где S_T — затраты, связанные с изготовлением и эксплуатацией режущего инструмента за период его стойкости; N — количество деталей, обработанных за период стойкости инструмента.

Очевидно, что чем больше период стойкости режущего инструмента, тем меньше расходы на его эксплуатацию. При $v, S, t \rightarrow 0$ $T \rightarrow \infty$, следовательно, $S_n \rightarrow 0$. Однако для каждого вида обработки, обрабатываемого и инструментального материалов существует максимально достижимое значение стойкости T_{np} (см. табл. 7.1). В этом случае период стойкости инструментов и скорость резания, обеспечивающие наименьшие расходы на их эксплуатацию [3],

$$T_S = (1-m) T_{np}; \quad (13.3)$$

$$v_{T_S} = \sqrt[m]{\frac{C_T}{(1-m)T_{np}}}.$$

Режимы резания, обеспечивающие наибольшую производительность, отличаются от режимов резания, обеспечивающих *наименьшую себестоимость обработки*.

Элементы заводской себестоимости условно делятся на элементы, значения которых изменяются в зависимости от режимов резания и стойкости режущего инструмента (переменная часть себестоимости), и элементы, значения которых не зависят от применяемых режимов резания (для конкретной детали принимаются постоянными).

Переменная часть себестоимости операции $C = T_0 E + (\tau_{cm} E)/N + S_T/N$, где E — стоимость станко-минуты работы станка, т.е. сумма заработной платы рабочего-станочника и стоимости эксплуатации станка, отнесенная к одной минуте.

Взяв производную dC/dT , после преобразований получим период стойкости и скорость, обеспечивающие наименьшую себестоимость:

$$T_C = \frac{1-m}{m} \left(\tau_{cm} + \frac{S_T}{E} \right); \quad (13.4)$$

$$v_C = \sqrt[1/m]{\frac{mC_T}{(1-m) \left(\tau_{cm} + \frac{S_T}{E} \right)}}$$

Структура выражения (13.4) аналогична структуре выражения (13.2), однако отношение S_T/E позволяет учесть не только «живой» труд, затрачиваемый на одном станке при смене инструмента, но и всю совокупность затрат «живого» и овеществленного труда, связанных с режущим инструментом. Поэтому для одной и той же операции период стойкости наименьшей себестоимости всегда больше, чем период стойкости наибольшей производительности.

Анализируя уравнения (13.2)–(13.4), легко заметить, что знаменатель в них растет в направлении $T_Q \rightarrow T_C \rightarrow T_S$. Это означает, что скорость резания, обеспечивающая наибольший период стойкости режущего инструмента, является минимальной в диапазоне оптимальных скоростей резания, а скорость наибольшей производительности — максимальной (рис. 13.7).

Различия в значениях v и T , оптимизирующих режим резания по разным экономическим показателям, обусловлены следующими факторами: 1) при увеличении τ_{cm} , S_T , $1/m$ и уменьшении E оптимальные значения скорости и стойкости смещаются ближе к значениям, соответствующим $S_T = \min$; 2) при увеличении τ_{cm} диапазон оптимальных скоростей резания для различных периодов стойкости инструмента (T_Q , T_C , T_S) сужается; 3) при увеличении E и уменьшении S_T значения скоростей наибольшей производительности и наи-

меньшей себестоимости сближаются; 4) оптимумы скорости сближаются при ужесточении технологических ограничений (точности детали и т.д.), поскольку в этом случае используются технологические критерии затупления, существенно ограничивающие уровень возможных периодов стойкости.

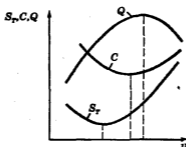


Рис. 13.7. Изменение производительности Q , себестоимости C и расходов на эксплуатацию режущего инструмента S_T в зависимости от скорости резания

Таким образом, при ступенчатом регулировании режимов резания на станке возможны случаи, когда оптимумы по нескольким критериям обеспечиваются при одном и том же режиме резания. Анализ различных критериев оптимальности показывает, что критерий наименьшей себестоимости имеет ограниченное значение для определения нормативных периодов стойкости. Это связано с тем, что для каждого типоразмера инструмента значение T_C существенно изменяется в зависимости от общего количества переточек и точности, с которой могут быть заданы величины, входящие в выражение (13.4).

Определение оптимальных режимов резания затруднено в связи с отсутствием достоверных сведений о значениях многочисленных физических параметров процесса резания. В традиционно используемых эмпирических зависимостях значения показателей степени и коэффициентов достаточно точны только для тех условий обработки, в которых они были определены. Эти данные в большинстве случаев не отражают непрерывного совершенствования свойств обрабатываемого и инструментального материалов, возросших возможностей металлорежущих станков и инструментов.

Однако достоверность программ, используемых на станках с ЧПУ, в обрабатывающих центрах и другом аналогичном оборудовании, полностью зависит от исходных данных о процессах резания, вво-

димых в качестве постоянных массивов в алгоритмы и программы технического нормирования. Обеспечение же оптимальных режимов резания в производственных условиях в течение достаточно длительного времени, например при обработке партии деталей, связано с рядом затруднений. Они обусловлены непостоянством системы резания во времени вследствие разного качества обрабатываемых заготовок, изменением жесткости детали по длине, изменяющимися динамическими характеристиками технологической системы, непостоянством нагрева станка и инструмента, изменением характеристик технологической среды и др.

Рассеивание ряда параметров системы резания приводит к большому расхождению между рассчитанным по формуле $T = f(v)$ и действительным значениями периода стойкости и определяемыми этим параметром оптимальными режимами резания. Кроме того, зависимость $T = f(v)$ получена, исходя из нормальных условий работы инструмента, т.е. выхода его из строя только вследствие износа. Между тем при работе гибких производственных систем необходимо учитывать и другие причины отказа, например поломки. Для учета вероятностной природы отказов инструмента целесообразно рассматривать систему резания как систему, эффективность которой зависит помимо обычных статей расхода от затрат на устранение отказов. Для такой системы в качестве критерия оптимизации принимают математическое ожидание затрат (средние затраты) на ее функционирование [6]:

$$\bar{C}_i = \sum_{l=1}^m P_{il} C_{il}$$

где i — номер ситуации, возникающей с вероятностью P_i и вызывающей появление затрат C_i ; m — число ситуаций, при котором $\sum_{l=1}^m P_{il} = 1$; l — номер режима.

При использовании указанного критерия можно сравнить эффективность работы станка на разных режимах. В этом случае оптимальным считают режим, при котором затраты минимальны. Такой подход используют, в частности, для станков с адаптивными системами управления, в которых в качестве критерия регулирования используется постоянство силы резания. Оптимизация осуществляется путем сравнения затрат C_i при различных значениях силы, и оптимальным считается такое регулирование системы, которое дает минимум затрат на ее функционирование.

Различные режимы обработки для разных поверхностей деталей легко обеспечиваются станками с ЧПУ. Однако при этом изменяется характер кривой износа инструмента во времени (рис. 13.8), а значит, зависимостей $T = (v, S, t)$. Изменяется также возможное количество деталей, обработанных за период стойкости режущего инструмента. Для расчета этого количества можно ввести понятие части периода стойкости, приходящейся на одну деталь:

$$\Delta T = \sum_{i=1}^n \frac{t_i}{T_i},$$

где n — количество поверхностей, обработанных данным инструментом на одной детали; t_i — время обработки i -й одиночной поверхности; T_i — период стойкости при обработке этой поверхности с постоянными режимами резания.

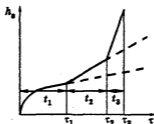


Рис. 13.8. Изменения износа во времени при резании на станке с ЧПУ

Тогда общее количество обработанных деталей $N = 1/\Delta T$ с округлением до целого числа.

В общем случае оптимальным при обработке деталей на станках с ЧПУ и обрабатывающих центрах можно считать любой период стойкости инструмента в диапазоне, соответствующем минимуму себестоимости и максимуму производительности. Однако чем выше стоимость оборудования, тем период стойкости должен быть ближе к соответствующему максимуму производительности.

По данным фирмы «Sandvik Coromant», стоимость режущих инструментов составляет в стоимости операции менее 3%. Это означает, что возрастание периодов стойкости режущих инструментов в современных условиях менее эффективно, чем рост режимов резания и производительности обработки. Действительно, повышение стойкости инструмента на 50% снижает затраты только на 1%, тогда как увеличение режимов резания на 20% обеспечивает снижение затрат на 15%.

Пример 13.1. Производится обработка трех поверхностей детали с различными режимами резания (табл. 13.3). Определить предельное количество деталей, обработанных за период стойкости.

Таблица 13.3

Данные и результаты расчетов

Номер поверхности	Скорость резания, м/мин	Подача, мм/об	Глубина резания, мм	Время обработки, мин	Период стойкости, мин	ΔT_i , %
1	125	0,5	5	0,5	17,5	2,8
2	143	0,5	4	0,3	13,7	2,2
3	168	0,2	1	0,1	9,5	1,1

Р е ш е н и е. Результаты расчетов приведены в табл. 13.3. Доля периода стойкости, приходящаяся на одну деталь, составляет 6,1 %, общее количество обработанных деталей — 16 шт.

Правильный выбор режимов резания на станках с ЧПУ или адаптивными системами имеет большое значение, учитывая высокую стоимость такого оборудования. В условиях автоматизированного производства важно знать, при каких режимах до затупления инструмента будет обработано максимальное количество деталей или обеспечена максимальная площадь обработанной поверхности при заданной глубине резания. Поэтому критериями оптимальности режима резания служат максимальное значение площади обработанной поверхности (для чистовой обработки) и максимальное значение объема снятого металла (для черновой обработки) за период стойкости при одновременной оптимизации по скорости, подаче и глубине резания. Принятые критерии обеспечивают максимальную производительность обработки за период стойкости инструмента.

13.3. Расчет режима резания

Одноинструментная обработка. При разработке технологического процесса обработки детали важное значение имеет правильный выбор режима резания. Его можно обеспечить либо методом оптимизации по различным критериям, либо на основе приближенных расчетов с использованием справочников. В последнем случае существует строго определенная последовательность расчетов, изложенная ниже.

1. Прежде всего выбирают инструментальный материал, конструкцию инструмента и геометрические параметры его режущей

части. Материал режущей части выбирают в зависимости от свойств обрабатываемого материала, состояния поверхности заготовки, условий резания (общие рекомендации по выбору инструментальных материалов приведены в гл. 2). Геометрические параметры инструмента назначаются в зависимости от свойств обрабатываемого материала, жесткости технологической системы, вида обработки (черновая, чистовая или отделочная) и других условий резания.

2. Назначают глубину резания с учетом припуска на обработку. При черновой обработке желательно назначать глубину резания, обеспечивающую срезание припуска за один проход. Количество проходов свыше одного при черновой обработке следует допускать в исключительных случаях (при снятии повышенных припусков). Полуцистовая обработка часто производится в два прохода. Первый (черновой) осуществляется при глубине резания $t = (0,6 \dots 0,75)l$, а второй (окончательный) — при $t = (0,3 \dots 0,25)l$. Обработка в два прохода в этом случае вызвана тем, что при снятии слоя толщиной свыше 2 мм за один проход качество обработанной поверхности низкое, а точность ее размеров недостаточная. При чистовой обработке в зависимости от точности и шероховатости обработанной поверхности глубину резания назначают в пределах 0,5...2 мм на диаметр, а при обработке с шероховатостью менее $Ra 1,25$ — в пределах 0,1...0,4 мм.

3. Выбирают подачу (при точении и сверлении — S_0 , мм/об, при фрезеровании — S_z , мм/зуб). При черновой обработке она устанавливается с учетом жесткости технологической станочной системы, прочности детали, способа ее крепления (в патроне, в центрах и др.), прочности и жесткости рабочей части режущего инструмента, прочности механизма подачи станка, а также установленной глубины резания. При чистовой обработке назначение подачи необходимо согласовывать с заданной шероховатостью обработанной поверхности и качеством точности, учитывая при этом возможный прогиб детали под действием сил резания и погрешности геометрической формы обработанной поверхности.

После выбора нормативной подачи выполняют проверочные расчеты. Например, подачу, выбранную для чернового точения с заданной глубиной резания, проверяют по осевой силе резания и прочности механизма подачи станка. При этом для данного обрабатываемого материала определяют глубину резания и подачу, осевую силу и сопоставляют ее с силой, которую допускает механизм подачи станка и которая указывается в его паспорте. Осевая сила резания должна быть меньше или, в крайнем случае, равна силе, допускаемой механизмом подачи:

$$P_x = C_{P_x} t^{x_{P_x}} S^{y_{P_x}} K_{P_x} \leq P_{ст.}$$

Если выбранная подача не удовлетворяет условиям прочности или жесткости инструмента и детали, необходимо понизить ее до уровня допустимой. Уменьшение подачи снижает силу резания, но глубина резания оказывает на силу более значительное влияние. Тем не менее уменьшают именно подачу, так как при уменьшении глубины сразу появляется необходимость во втором проходе и возрастает время обработки. Кроме того, глубина резания только в малой степени влияет на изменение периода стойкости инструмента и v_T , тогда как при уменьшении подачи v_T возрастает.

Необходимо отметить, что на практике проверочные расчеты по формулам выполняются редко ввиду их сложности. При необходимости используются таблицы предельно допустимых подач, приведенные в ряде справочников.

Принятая подача уточняется по паспорту станка. При этом принимают ближайшую из имеющихся на станке подач. Допускается принимать ближайшую большую, если она превышает нормативную не более чем на 10 %.

4. Определяют скорость резания. Скорость резания, допустимая режущим инструментом при определенном периоде его стойкости, зависит от глубины резания, подачи, материала режущей части инструмента, его геометрических параметров, обрабатываемого материала, вида обработки, охлаждения и других факторов.

При данных глубине резания, подаче и периоде стойкости можно рассчитать скорость резания:

при точении

$$v = \frac{C_v}{T^{m_t} x_v S^{y_v}} K_v;$$

при сверлении

$$v = \frac{C_v D^{x_v}}{T^{m_t} S^{y_v}} K_v;$$

при фрезеровании

$$v = \frac{C_v D^{q_v}}{T^{m_t} x_v S^{y_v} B^{n_v} z^{r_v}} K_v,$$

где C_v — коэффициент, учитывающий условия работы инструмента, принятые в справочнике за основу; K_v — коэффициент, учитывающий отличие конкретных условий работы инструмента от принятых за основу; x_v, y_v, q_v, n_v, r_v — показатели степени.

Нормативные периоды стойкости принимаются с учетом экономических факторов и производственного опыта эксплуатации инструментов. Определяющими могут являться требования производительности обработки, ее экономичности, минимума затрат на эксплуатацию инструмента и др. В конкретных условиях работы инструмента периоды стойкости могут быть различными. Однако их значительное увеличение требует снижения скорости резания, а значит, и производительности обработки, что экономически невыгодно.

В справочниках значения скоростей резания обычно приводятся в таблицах с учетом определенных условий работы. Если конкретные условия отличаются от тех, для которых составлена данная нормативная таблица, то при выборе скорости резания табличные значения умножают на поправочные коэффициенты, учитывающие свойства обрабатываемого и инструментального материалов, особенности обработки и т.д.

По расчетной скорости резания подсчитывают частоту вращения шпинделя станка: $n = 1000v/(\pi D)$. Полученное значение n уточняют по паспорту станка и принимают ближайшее из имеющихся на станке.

По действительной частоте вращения шпинделя определяют фактическую скорость резания: $v_{\phi} = \pi D n_{\phi} / 1000$, а при фрезеровании — также действительную минутную подачу $S_{\phi} = S_z z n_{\phi}$ с уточнением ее по паспорту станка.

5. При черновой обработке проверяют выбранный режим резания по мощности станка. В этом случае должно соблюдаться соотношение

$$N_p \leq 1,3\eta N_{ст},$$

где N_p — мощность резания, определяемая по таблицам или формулам путем использования значений P_z и v либо M_k и n (см. гл. 5); 1,3 — коэффициент, учитывающий возможность кратковременной перегрузки электродвигателя станка; η — коэффициент полезного действия привода главного движения; $N_{ст}$ — мощность электродвигателя.

Если окажется, что мощности электродвигателя станка, на котором должна производиться обработка, не хватает, надо выбрать более мощный станок. Если это невозможно, необходимо уменьшить выбранные значения v или S . Уменьшение v выгоднее, так как машинное время будет таким же, как и при уменьшении S , но зато период стойкости инструмента значительно возрастает.

6. Определяют основное время каждого прохода (формулы для его расчета при различных видах обработки приводятся в нормативно-справочной литературе):

$$T_0 = \frac{l_1 + l + l_2}{nS},$$

где l — длина обрабатываемой поверхности; l_1, l_2 — длины соответственно врезания и перебега, определяемые по таблицам.

Пример 13.2. Рассчитать режим резания при токарной обработке на проход вала из стали 45 НВ 207; диаметр заготовки 80 мм, диаметр детали 72 мм, длина обработки 60 мм, обработка черновая, станок 16К30ФЗ.

Р е ш е н и е. 1. Выбираем для обработки резец, оснащенный квадратной неперегачиваемой пластиной из твердого сплава Т15К6 с углом в плане $\varphi = 45^\circ$, радиусом вершины $r_n = 1,2$ мм.

2. Глубина резания $t = (80 - 72)/2 = 4$ мм.

3. Согласно карте 3.1 [7] выбираем подачу для черновой обработки:

$$S = S_{\text{табл}} K_{S_1} K_{S_2} K_{S_3} K_{S_4} = 0,60 \cdot 0,8 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 0,48 \text{ мм/об},$$

где $S_{\text{табл}}$ — табличное значение подачи; $K_{S_1} K_{S_2} K_{S_3} K_{S_4}$ — поправочные коэффициенты, учитывающие соответственно габариты станка, твердость обрабатываемого материала, вид обработки и радиус вершины.

Подачу $S = 0,48$ мм/об можно реализовать на станке, поскольку его привод подач бесступенчатый.

4. По карте 3.3 определяем:

$$\begin{aligned} v &= v_{\text{табл}} K_{v_1} K_{v_2} K_{v_3} K_{v_4} K_{v_5} K_{v_6} = \\ &= 166 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,15 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 191 \text{ м/мин}, \end{aligned}$$

где $v_{\text{табл}}$ — табличное значение скорости резания; K_{v_1}, \dots, K_{v_6} — поправочные коэффициенты, учитывающие соответственно влияние инструментального материала, свойств и твердости обрабатываемого материала, формы пластины, вида обработки и периода стойкости резца (в нашем случае принято $T = 30$ мин).

Тогда частота вращения шпинделя станка $n = 1000 \cdot 191 / (80\pi) = 760$ об/мин; эту величину обеспечивает бесступенчатый привод главного движения станка.

5. По карте 3.3 определяем:

$$\begin{aligned} N_p &= N_{\text{табл}} K_N K_{v_1} K_{v_2} K_{v_3} K_{v_4} K_{v_5} K_{v_6} = \\ &= 9,8 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,15 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 11,27 \text{ кВт}, \end{aligned}$$

где $N_{\text{табл}}$ — табличное значение мощности резания; K_N — поправочный коэффициент, учитывающий твердость стали.

В нашем случае $N_p = 11,27 < 1,3 \cdot 22 \cdot 0,8 = 22,9$ кВт.

6. Основное время при обработке вала

$$T_0 = (5 + 60 + 2)/(760 \cdot 0,48) \approx 0,18 \text{ мин.}$$

Многоинструментная обработка на автоматизированном оборудовании. Выбор наиболее выгодных режимов резания при многоинструментной обработке — сложная задача, так как наряду с учетом особенностей работы каждого отдельного инструмента необходимо провести общий анализ всей наладки, т.е. совокупности инструментов, используемых на станке, и распределения между ними переходов обработки. Общие принципы расчета режима резания в этом случае аналогичны расчетам при одноинструментной обработке.

1. После выбора инструментальных материалов, конструкции и геометрии инструментов для каждого из них назначают наибольшую возможную в данных условиях глубину резания.

2. Выбирают максимально допустимые по технологическим требованиям и конструкции станка подачи, сначала для отдельных инструментов, а затем для всего суппорта или шпинделя. Если подачи нескольких инструментов связаны между собой, принимают наименьшую из них.

3. Выбирают периоды стойкости режущих инструментов. Они должны быть больше, чем при одноинструментной обработке, так как в нашем случае значительно увеличиваются затраты времени на смену и подналадку инструментов, их суммарная стоимость и расходы на переточку. В наиболее простом случае, когда одновременно работает n одинаковых инструментов в совершенно одинаковых условиях, принимают $T_z = nT$, где T — оптимальный период стойкости режущего инструмента при одноинструментной обработке, рассчитанный по формулам (13.2)–(13.4). Как правило, на станке одновременно работают различные по конструкции и нагруженности инструменты и определение наиболее выгодного периода их стойкости сложно и трудоемко [5]. В связи с этим, а также с необходимостью уточнения режимов резания непосредственно в ходе обработки партии деталей обычно используют упрощенные методы расчета. Они базируются на том, что в наладке имеется небольшое количество инструментов с самыми низкими периодами стойкости, тогда как у некоторых инструментов они очень велики. Инструмент, период стойкости которого будет минимальным, называется *лимитирующим*, т.е. ограничивающим режим резания. Такой инструмент поднастраивается и меняется наиболее часто. Связанные с этим простои сильно влияют на производительность станка

и стоимость обработки. Поэтому при расчете режимов резания для многоинструментных станков за основу принимается лимитирующий инструмент. Именно для него назначают скорость резания, обеспечивающую требуемый период стойкости. При этом необходимо учитывать, что данный период должен быть значительно выше, чем для одноинструментной обработки, поскольку учитывает сложность наладки и количество входящих в нее инструментов. Для одношпиндельных прутковых токарных автоматов период стойкости принимают до 120 мин машинной работы, а для многошпиндельных — 150 мин. Это составляет соответственно 3–4 и 2–3 замены инструмента в течение рабочей смены.

Как указывалось, табличные значения периодов стойкости измеряются в минутах машинной работы. Это существенное отличие по сравнению с одноинструментной обработкой, когда период стойкости измеряется в минутах времени резания. В первом случае длины рабочих ходов инструмента $L_{p,x}$ могут быть значительно больше, чем длина резания L_p (рис. 13.9). Их соотношение определяется коэффициентом времени резания $\lambda = L_p / L_{p,x} = T / T_m$, где T_m — период стойкости (в минутах машинной работы). Если $\lambda \geq 0,7$, его можно не учитывать и принимать $T = T_m$. Если же $\lambda < 0,7$, в дальнейших расчетах скорость резания находят для периода стойкости $T = \lambda T_m$.

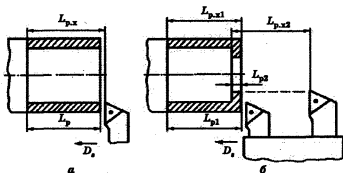


Рис. 13.9. Соотношение длин резания и рабочего хода при обработке:
а — одноинструментной; б — многоинструментной

4. Определяют скорость резания, обеспечивающую требуемый период стойкости лимитирующего инструмента, и соответствующую ей частоту вращения шпинделя, которую уточняют по паспорту станка. Расчеты выполняются аналогично расчетам при одноинст-

рументной обработке. В случае использования сразу нескольких лимитирующих инструментов выбирают минимальную частоту вращения.

Если каждому из инструментов наладки может соответствовать своя частота вращения шпинделя, например для агрегатного станка, ее определяют отдельно для каждого инструмента при условии его изолированной работы, приняв период стойкости равным T_m .

При работе на многооперационных станках с ЧПУ применяют два варианта определения v_T . Первый используют для станков с возможностью наблюдения за процессом обработки или станков, снабженных устройствами контроля состояния режущих инструментов (см. гл. 7). Тогда вся методика назначения режима резания каждым инструментом соответствует случаю одноинструментной обработки.

Второй вариант используют при организации работы станков с минимальным участием оператора и при наличии средств регистрации количества обработанных деталей или времени наработки инструментов на отказ. Если на многооперационном станке с ЧПУ требуется обработать определенную партию деталей, после расчета времени резания каждым инструментом определяют количество q деталей, обрабатываемых им за принятый период стойкости T_m [4]:

$$\tau_p = \sum_{i=1}^k \frac{L_{pi}}{n_i S_{oi}}; q = \frac{T_m}{\tau_p},$$

где τ_p — время резания i -м инструментом на всех переходах обработки детали; k — количество переходов.

Для лимитирующих инструментов, которые обрабатывают наименьшее количество деталей и вносят наиболее значительный вклад в общее время обработки, задается количество деталей q_T , обрабатываемых за принятый период стойкости, которое кратно объему партии деталей N , причем $q_T \geq q$. При этом предполагают, что нелимитирующие инструменты будут заменены после обработки всей партии деталей (если $q_i \geq 0,8q$) либо одновременно с лимитирующими (если $q_i < 0,8q$). Таким образом, производится выравнивание q_T внутри каждой группы инструментов. Затем рассчитывают скорость резания с учетом вероятности безотказной работы инструмента. Для этого пользуются соответствующими поправочными коэффициентами (см. § 7.7), принимая за исходную вероятность безотказной работы $P = 0,7$. Частота вращения инструмента на первом переходе для данной вероятности [4]

$$n_{i0,7} = n_i \left(\frac{q}{q_T} \right)^{\frac{m_i}{1-m_i}},$$

где n_i — частота вращения, найденная по методике, рассмотренной в п. 4; m_i — показатель относительной стойкости инструмента при работе на i -м переходе.

5. Определяют основные времена работы каждого инструмента. Если они резко различаются, необходимо принять меры по их выравниванию. Это можно сделать путем перераспределения между инструментами припуска на обработку, изменения структуры переходов, уменьшения подач и частот вращения отдельных суппортов или шпинделей, в которых установлены нелимитирующие инструменты. Интервал варьирования частот вращения шпинделей рекомендуется принимать в следующих пределах:

$$n_1 = \frac{n_{\min} T_{o \max}}{T_{o \min}}; \quad n_2 = \frac{n_{\max} T_{o \min}}{T_{o \max}},$$

где n_{\min} , n_{\max} — соответственно наименьшая и наибольшая частоты вращения, обеспечиваемые станком; $T_{o \min}$, $T_{o \max}$ — наименьшее и наибольшее основное время для различных инструментов наладки.

6. После корректировки режимов резания выполняют проверочный расчет по мощности резания. Для этого сравнивают сумму мощностей резания всех инструментов, одновременно работающих на станке, с мощностью привода главного движения.

Оптимизация режима резания

13.4. с применением ЭВМ

Современная вычислительная техника позволяет не только рассчитать режим резания по формулам, приводимым в нормативно-справочной литературе, но и выбрать оптимальный режим применительно к обработке конкретной детали. При этом исходят из того, что все переменные факторы, кроме элементов режима резания, известны заранее и постоянны.

Задача выбора режимов работы инструмента в этом случае заключается в получении таких искомых параметров процесса, которые обеспечили бы его максимальную эффективность в заданных

конкретных производственных условиях при выполнении всех требований к нему. Последние накладывают определенные *технические ограничения* на возможные параметры резания. Эти ограничения условно можно разделить на несколько групп:

1) диапазоны возможных (или целесообразных) значений каждого из искомых параметров, определяемые режущей способностью инструментов при обработке данного материала, техническими характеристиками оборудования и т.д.;

2) кинематические и пространственно-временные связи между инструментами в наладке (это относится в основном к многоинструментным наладкам);

3) предельно допустимые значения ряда физических и технологических характеристик процесса резания, например температура в зоне резания, шероховатость и точность обработанной поверхности и другие, обусловленные требованиями к обработанной детали;

4) ограничения по стойкости инструментов, учитывающие требования к периодичности смены инструмента, связанные с особенностями технологического процесса и организационной формой обслуживания оборудования;

5) предельные силы и мощность резания, допустимые исходя из условий прочности и жесткости технологической системы с учетом технических возможностей оборудования и требуемой точности обработки; эти ограничения относятся как к отдельным инструментам наладки, так и к некоторым их автономным группам (в последнем случае речь идет, как правило, о суммарных силах и мощностях);

6) ограничения, обусловленные имеющимися ресурсами (материальными, временными и т.д.); на осуществление процесса обработки в заданное время в требуемом объеме.

При разработке процедур расчета режимов резания необходимо учитывать сложные взаимосвязи различных факторов, характеризующих процесс обработки. Параметры, описывающие этот процесс, подразделяются на входные и выходные и связаны между собой сложными функциональными зависимостями. Совокупность этих зависимостей образует математическую модель процесса обработки.

В настоящее время интенсивно проводятся исследования с целью установления вероятностных закономерностей процесса обработки. Эти закономерности аппроксимируются, как правило, с помощью таких функций распределения, как нормальный и логарифмический законы, или их комбинаций (см. гл. 7). Вероятностные модели

наиболее адекватно описывают реальные закономерности процесса резания, но являются, как правило, достаточно сложными и громоздкими для анализа. Это обстоятельство, а также недостаточная изученность вероятностной природы процесса резания привели к тому, что в настоящее время наибольшее распространение при расчете режимов резания получили детерминированные модели, построенные на базе усредненных характеристик процесса.

В задачах расчета режимов резания набор входных параметров разделяется на искомые (управляемые) и заданные (неуправляемые). Задача расчета оптимальных режимов резания заключается в определении таких значений искомых параметров из множества возможных, которые являются наилучшими (в том или ином смысле) по совокупности выходных параметров процесса при заданном значении неуправляемых параметров.

Существует несколько различных подходов к оценке проектных решений по совокупности показателей. Применительно к задачам расчета режимов резания наибольшее распространение получил подход, связанный с выделением одного из них в качестве *критерия оптимальности (целевой функции)* и указанием диапазонов возможных значений для остальных. В этом случае оптимальными считаются такие значения искомых параметров, которые обеспечивают наибольшее (наименьшее) значение целевой функции при условии, что остальные выходные параметры находятся в заданных пределах. Эти пределы определяются возможностями технологической системы, требованиями к обработанной детали и конкретными условиями производства.

Структурно все технико-экономические критерии одинаковы и могут быть представлены в обобщенном виде [8]:

$$Q_i = A_{1j}\tau_1 + A_{2j}\tau_2 + A_{3j}$$

где Q_i — i -й показатель процесса; A_{ij} — постоянные для данного технологического процесса величины, учитывающие (в зависимости от рассматриваемого показателя) такие технико-экономические параметры процесса, как стоимость станко-минуты работы с учетом заточки инструмента, заработная плата станочника и наладчика, стоимость инструмента, число его переточек и их стоимость, число подналадок станка за период стойкости инструмента и т.д.; τ_1 — основное технологическое время, зависящее от режимов резания; τ_2 — время технического и организационного обслуживания рабочего места, отнесенное к одной детали (поверхности, рабочему ходу) и зависящее от режимов резания.

В частности, зависимость Q_i от скорости резания v и подачи S при постоянных значениях остальных входных параметров может быть представлена в следующем виде:

$$Q_i = \frac{A'_{ij}}{vS} + \frac{A'_{i2}}{vST} + A'_{i3}, \quad (13.5)$$

где A'_{ij} — постоянные для данных условий обработки величины, получаемые из постоянных A_{ij} с учетом размеров обрабатываемых поверхностей и рабочих ходов, времени на смену инструмента и его подналадку.

Задача расчета оптимальных режимов резания в общем случае описывается следующим образом. Пусть $X = (x_1, \dots, x_n)$ — набор искоемых параметров; x_i — множество его целесообразных значений; $R_i(x)$ — значения i -й характеристики процесса резания в зависимости от набора X искоемых параметров; \bar{R}_i — заданное предельное значение i -й характеристики процесса резания; $F(x)$ — принятый критерий оптимальности в зависимости от набора искоемых параметров X . Тогда задача расчета оптимальных режимов резания сводится к следующей задаче математического программирования:

$$F(x) \rightarrow \min (\max); \quad (13.6)$$

$$R_i(x) \leq \bar{R}_i, \quad i = \overline{1, m}; \quad (13.7)$$

$$x \in X. \quad (13.8)$$

Сложность поставленной задачи, а также возможные методы ее решения во многом определяются свойствами множества X функций $F(x)$ и $R_i(x)$.

В рамках общей задачи оптимизации режимов резания, описываемой соотношениями (13.5)–(13.8), возникают конкретные варианты постановки задачи и соответствующие математические модели, которые могут быть классифицированы: по составу набора x оптимизируемых переменных; составу учитываемых показателей процесса; принятому критерию оптимальности; виду функций $F(x)$ и $R_i(x)$, аппроксимирующих основные закономерности процесса; степени учета индетерминированности процесса резания и неопределенности исходной информации.

Каждый из вариантов постановки задачи оптимизации режимов резания приводит к своей математической модели и конкретным методам решения. Одним из наиболее распространенных методов оптимизации является *линейное программирование*, предполагающее,

что целевая функция оптимизации линейна [2]. При работе за один проход в качестве целевой функции принимается зависимость

$$F = CnS,$$

где C — постоянный коэффициент.

Указанная функция при использовании в расчетах экономических периодов стойкости обеспечивает наименьшее штучное время обработки.

Влияние технических ограничений на режимы резания выражается в виде неравенств, представляющих собой зависимость рассматриваемой величины от элементов режима резания n , S , t . Глубину резания t , как правило, принимают постоянной, предполагая, что работа ведется в один проход.

Технические ограничения, которые учитываются при оптимизации режима резания, во многом зависят от вида обработки. Например, при точении учитываются следующие ограничения: по режущим возможностям инструмента, мощности резания, заданной производительности обработки, прочности и жесткости державки резца, жесткости детали, прочности твердосплавной пластины, осевой силе, шероховатости обработанной поверхности, кинематическим возможностям станка. Рассмотрим некоторые из них.

Ограничение по режущим возможностям инструмента устанавливает взаимосвязь скорости резания, обусловленной кинематикой станка, и скорости, обусловленной принятым периодом стойкости инструмента, глубиной резания, подачей, свойствами обрабатываемого материала и т.д.:

$$v \leq [v]; \quad \frac{\pi Dn}{1000} \leq \frac{C_v}{T^{m_t} \cdot S^{y_v}} K_v; \quad nS^{y_v} \leq \frac{318C_v}{DT^{m_t} \cdot x} K_v.$$

Ограничение по производительности станка учитывает взаимосвязь расчетных скорости резания и подачи с заданной производительностью. Оно имеет важное значение, так как никакой режим не может быть признан оптимальным, если он не обеспечивает требуемой производительности.

Допустимая продолжительность цикла работы станка (в минутах)

$$[\tau]_n = \frac{60K_3 r_Q}{Q},$$

где K_3 — коэффициент загрузки станка; r_Q — число деталей, обрабатываемых одновременно на одной позиции; Q — заданная производительность станка, шт/ч.

Время цикла может быть выражено так:

$$\tau_{\text{ц}} = T_0 + T_{\text{в.п}} = \frac{L_{\text{р.п}}}{nS} + T_{\text{в.п}},$$

где T_0 — основное технологическое время, мин; $T_{\text{в.п}}$ — вспомогательное непрерываемое время, мин.

Приняв $\tau_{\text{ц}} \leq [\tau_{\text{ц}}]$, после ряда преобразований получим:

$$nS \geq \frac{L_{\text{р.п}}Q}{60K_{\text{р}}Q} - T_{\text{в.п}}Q.$$

Ограничения по кинематическим возможностям станка имеют вид:

$$n \leq n_{\text{ст max}}; \quad n \geq n_{\text{ст min}}; \quad S \leq S_{\text{ст max}}; \quad S \geq S_{\text{ст min}}.$$

Рассмотрим другие методы обработки. Для сверления необходимо учитывать следующие ограничения: наибольшую скорость резания, которую допускают режущие возможности сверла; требуемую производительность обработки; наименьшую скорость резания, удовлетворяющую условия стружкообразования; наибольшую подачу, допустимую прочностью и жесткостью сверла и обеспечивающую стабильный отвод стружки из зоны резания; требуемую шероховатость поверхности отверстия; точность диаметрального размера; погрешности расположения оси отверстия; кинематические возможности станка и др.

Для шлифовальных работ учитываются следующие ограничения: шероховатость обработанной поверхности; точность детали; производительность обработки; температура в зоне шлифования, исключающая появление прижогов; мощность привода вращения круга; период стойкости круга и условия его самозатачивания и др.

Для построения математической модели процесса резания и использования с целью определения оптимальных режимов резания основных положений линейного программирования необходимо все неравенства технических ограничений и уравнений целевой функции преобразовать в линейный вид. Это легко сделать, прологарифмировав эти выражения, поскольку все они имеют вид степенных функций. Введя обозначения $\lg l = X_1$ и $\lg S = X_2$, получим систему линейных неравенств и линейную функцию, подлежащую оптимизации, которые в совокупности и представляют собой математическую модель процесса резания. В общем случае она имеет следующий вид:

$$z_1 X_1 + y_1 X_2 \geq b_1;$$

$$z_2 X_1 + y_2 X_2 \geq b_2;$$

.....

$$z_n X_1 + y_n X_2 \geq b_n;$$

$$f_0 = (X_1 + X_2) \rightarrow \max.$$

Определение оптимальных режимов резания методом линейного программирования математически сводится к тому, чтобы среди всевозможных неотрицательных значений X_1 и X_2 системы найти такие значения $X_{1 \text{ опт}}$ и $X_{2 \text{ опт}}$, при которых линейная форма целевой функции принимает наибольшее возможное значение [2]. Это можно обеспечить путем решения системы неравенств на ЭВМ либо графическим способом. В последнем случае каждому линейному неравенству системы и линейной форме целевой функции на плоскости $X_1 - X_2$ соответствуют прямые линии, при пересечении которых образуется ряд точек. Координаты некоторых точек удовлетворяют всем ограничениям. В теории линейного программирования доказывается, что в случае, если система ограничений не противоречива, т.е. совместна, указанное множество точек является выпуклым замкнутым многоугольником $ABCDEG$ (рис. 13.10), координаты вершин которого являются корнями совместного решения уравнений, а точки, принадлежащие площади, ограниченной многоугольником, удовлетворяют всем неравенствам.

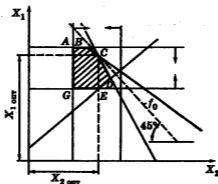


Рис. 13.10. Графическое изображение оптимизации методом линейного программирования

Прямая каждого из неравенств системы делит плоскость на две полуплоскости. По одну сторону от прямой расположены значения,

удовлетворяющие неравенству. Точки, расположенные по другую сторону, не удовлетворяют решению неравенств. Точки, лежащие на самой прямой, удовлетворяют уравнению. Указанные линии называются *границными*.

Зависимость F , подлежащая оптимизации, показывается прямой, наклоненной под углом 45° к осям координат. Если линейную функцию, имеющую выражение $f_0 = X_1 + X_2$, максимизировать, она займет положение, при котором расстояние от нее до начала координат будет наибольшим. Это произойдет, когда линия f_0 пройдет через крайнюю точку многоугольника ограничений. Координаты этой точки и дадут оптимальные значения $X_{1 \text{ опт}}$ и $X_{2 \text{ опт}}$.

Найдя координаты $X_{1 \text{ опт}}$ и $X_{2 \text{ опт}}$, на основании уравнений логарифмирования определяем оптимальные значения элементов режима резания.

Пример 13.3. Определить режим резания при токарной обработке детали из стали 45 с $\sigma_b = 650$ МПа. Диаметр заготовки 80 мм, длина обработки 120 мм, припуск на диаметр 10 мм. Шероховатость обработанной поверхности Ra 2,5, точность обработки 0,1 мм, минимальная производительность 15 шт/ч, вспомогательное непрерывное время 0,5 мин, длина рабочего хода 120 мм, станок 16К20, коэффициент загрузки станка 0,8.

Р е ш е н и е. По справочнику выбираем инструментальный материал Т15К6; резец с сечением державки 10×25 мм и вылетом 35 мм оснащен твердосплавной пластиной толщиной 5,16 мм, имеет угол в плане $\varphi = 45^\circ$, радиус вершины $r_n = 1,0$ мм; допустимый прогиб державки резца 0,05 мм. Период стойкости резца 45 мин. Эти сведения, а также значения коэффициентов и показателей степеней в зависимостях $P_z, P_y, P_x = f(v, S, t)$ были введены в ЭВМ в качестве исходных данных, после чего был получен оптимальный режим резания $n_{\text{опт}} = 775$ об/мин, $S_{\text{опт}} = 0,416$ об/мин с соответствующей графической интерпретацией. На рис. 13.11 цифрами обозначены следующие ограничения: 1 — по периоду стойкости; 2, 8 — по минимальной и максимальной допустимым подачам; 3, 10 — по максимальной и минимальной допустимым частотам вращения; 4 — целевая функция; 5 — по шероховатости; 6 — по прочности твердосплавной пластины; 7 — по прочности державки; 9 — по требуемой производительности.

Еще одним методом оптимизации режима резания является *динамическое программирование*. Оно используется в случаях, когда система резания отвечает следующим требованиям [9]:

- развивается во времени;
- допускает выбор оптимального решения на каждом этапе (шаге) развития системы без учета значений управляемых переменных на предыдущем этапе;

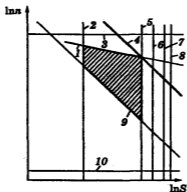


Рис. 13.11. Многоугольник ограничений

- имеет критерий оптимальности, приемлемый на каждом этапе;
- содержит ограниченное количество переменных.

При динамическом программировании рассматривается модель, которая характеризуется координатами X и управлениями U . Даны функции $f(X, U)$, отражающие связь между X и U и характеризующие изменения состояния системы (ее движение). Начальное и конечное состояния ограничены областью допустимых значений X ($X_{\text{доп}}$). Требуется найти такое управление U из допустимой области $U \in v$, при котором критерий оптимальности K принимает экстремальное значение, т.е. $K = \text{extr}F(X, U)$. Оптимальное управление U выбирается путем последовательного, на каждом n -м шаге, решения рекуррентного соотношения Беллмана [9]:

$$f_n(X) = \text{extr}\{ \varphi_n(X_n, U_n) + f_{n-1}[R(X_n, U_n)] \},$$

где $f_n(X)$ — функция, определяющая оптимальное управление на n -м шаге при изменении состояния системы от X_0 до X_n ; $\varphi_n(X_n, U_n)$ — значение критерия эффективности системы, полученное при оптимальном управлении U_n при заданном состоянии X_n на шаге n ; $R(X_n, U_n)$ — состояние системы после ее преобразования на шаге n ; U_n — выбранное решение (управление) на n -м шаге.

Рекуррентными называются формулы для расчета какого-то n -го члена последовательности, если он выражается как функция от некоторого числа предыдущих членов последовательности. В нашем случае таким n -м членом является функция $f_n(X)$, которая при различных шагах n принимает ряд значений, т.е. образует последовательность.

При выборе управления на n -м шаге исходной информацией являются только значения параметров состояния системы в начале n -го шага.

Пример 13.4. Рассмотрим использование динамического программирования для оптимизации режима сверления глубоких отверстий спиральными сверлами. В этом случае сверла должны периодически выводиться из отверстия для удаления стружки, поэтому сверление осуществляется за несколько проходов. Режим резания (v , S) ограничивается прочностью сверла и техническими требованиями к отверстию. Поскольку глубина сверления влияет на искривление оси и разбивание отверстия и постоянно изменяется, то из условия получения заданной точности очевидно, что v и S также должны меняться по мере углубления сверла в отверстие (рис. 13.12). При этом сверление может быть выполнено за различное число проходов k , а каждый i -й проход может иметь различную длину l_i ($0 \leq l_i \leq L$).

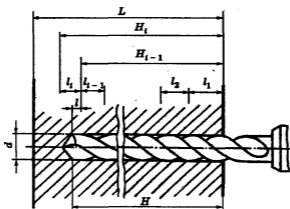


Рис. 13.12. Размеры H , l при многопроходном сверлении

На точность обработки и период стойкости сверла влияют не только общая длина H и заглубление сверла, но и длина l участка отверстия, просверленного на i -м проходе:

$$L = H - H_{i-1}; \quad 0 \leq l \leq l_i,$$

где H — заглубление сверла в данный момент (на i -м проходе); H_{i-1} — длина просверленного отверстия на предыдущем $(i-1)$ -м, проходе: $H_{i-1} = l_1 + l_2 + \dots + l_{i-1}$.

Таким образом, на крутящий момент, а следовательно, на режимы v и S , а также на период стойкости сверла при многопроходной обработке

влияет сочетание величин l и H и характер их изменения в процессе обработки. Так как изменение l и H зависит от количества проходов k и длины l_i каждого прохода, то режимы v , S , время обработки, период стойкости T и затраты C на обработку также зависят от k и l_i .

Целевая функция в случае использования метода динамического программирования имеет следующий вид:

$$C = \sum_{i=1}^k \left[\tau_i \left(E + \frac{E\tau_{см} + H}{T_0} \right) + E\tau_x \right],$$

где τ_i — время сверления на i -м проходе; E — приведенные затраты на эксплуатацию станка и зарплату рабочего (не считая затрат на инструмент); $\tau_{см}$ — время на смену сверла; H — приведенные затраты на эксплуатацию инструмента за период стойкости, включая его заточку; T_0 — оптимальный период стойкости; τ_x — время одного подвода и отвода сверла.

Время i -го прохода при переменных v (частоте вращения n) и S

$$\tau_i = \int_{H_{i-1}}^{H_i} \frac{dH}{n(H)S(H)},$$

где $n(H)$, $S(H)$ — функции, определяющие зависимость n и S от H .

Таким образом, выражение для C является, как видно из приведенных выше зависимостей, функционалом, который надо минимизировать с целью получения наименьших затрат.

Минимизация функционала осуществляется путем многократного (пошагового) решения рекуррентного уравнения Беллмана, которое в данном случае имеет вид

$$C_k^{(L)} = \min \left[C_{i=k}^{(l_k)} + \sum_{i=0}^{i=k-1} C_i^{(l_i)} \right],$$

где $C_k^{(L)}$ — затраты на обработку отверстия длиной L за k проходов; $C_{i=k}^{(l_k)}$ — затраты на обработку отверстия на последнем, k -м, проходе длиной l_k ; $\sum_{i=0}^{i=k-1} C_i^{(l_i)}$ — минимальные затраты на обработку отверстия за все i -е проходы, предшествующие последнему, k -му, т.е. при $0 \leq i \leq k-1$.

С использованием рекуррентного уравнения надо найти такое соотношение количества проходов k и длин l_i каждого i -го прохода, которые обеспечивали бы минимальное значение критерия оптимальности.

Пошаговое решение уравнения можно осуществлять в такой последовательности. Длина L разбивается на достаточно большое количество m рав-

ных отрезков Δ таким образом, чтобы значение Δ не превышало минимально возможной длины любого i -го прохода: $L = m\Delta$. По уравнению целевой функции рассчитываются затраты на обработку за один проход отверстия различной длины при $\Delta, 2\Delta, 3\Delta, \dots, L = m\Delta$ (рис. 13.13, а). На последующем шаге принимается $k = 2$ и рассчитываются затраты $C_{i-k}^{(k)}$ на последнем, втором, проходе и затраты $\sum_{i=0}^{k-1} C_i^{(k)}$ на первом проходе.

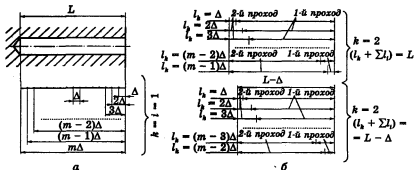


Рис. 13.13. Варианты обработки при $k = 1$ и $k = 2$

Такие расчеты выполняют последовательно при $l_1 = L - \Delta, l_k = l_2 = \Delta$; при $l_1 = L - 2\Delta, l_k = l_2 = 2\Delta$; при $l_1 = \Delta, l_k = L - \Delta$ (рис. 13.13, б). При этом минимальные значения $C_{i-k}^{(k)}$ и $\sum_{i=0}^{k-1} C_i^{(k)}$ при разных $l_1 = l_1$ и $l_k = l_2$ обеспечиваются за счет оптимизации режимов резания. Из всех пар значений $\Delta \leq l_1 \leq L - \Delta$ и $\Delta \leq l_k \leq L - \Delta$ определяются такие, при которых $C_k^{(L)} = C_2^{(L)}$ имеет минимальное значение: $C_2^{(L)}$.

Поскольку для расчета $C_3^{(L)}$ при трехпроходной обработке ($k = 3$) в рекуррентном уравнении надо знать величину затрат $\sum_{i=0}^{k-2} C_i^{(k)}$ на первых двух проходах, т.е. $C_1^{(k)} + C_2^{(k)}$, рассчитывают также затраты на двухпроходную обработку отверстия длиной $L - 2\Delta$ ($l_k = \Delta$), $L - 3\Delta$ ($l_k = 2\Delta$), $L - 4\Delta$ ($l_k = 3\Delta$) и т.д. При длине просверленного отверстия $L - \Delta$ (за два прохода) находят такие $l_1 = l_1, l_k = l_2$, при которых $\sum_{i=0}^{k-2} C_i^{(k)}$ имеет минимальное значение.

Аналогично находят такие l_1 и l_k , которые обеспечивают минимум затрат при обработке за два прохода отверстия длиной $L - 2\Delta, L - 3\Delta, \dots$,

$L - (m - k)\Delta$. Далее затраты на обработку отверстия длиной $L - \Delta$, $L - 2\Delta$, $L - 3\Delta$, ..., $L - (m - k)\Delta$ за два прохода будут учитываться как сумма $\sum_{i=1}^2 C_i^{(k)}$ при различных l_i (l_1 и l_2): при $l_1 + l_2 = L - \Delta$, при $l_1 + l_2 = L - 2\Delta$, ..., при $l_1 + l_2 = L - (m - k)\Delta$.

На следующем, третьем, шаге производят расчет затрат на обработку отверстия за три прохода ($k = 3$). Для этого принимают (рис. 13.14, а) $l_3 = l_k = \Delta$, а l_1 и l_2 берут такими, чтобы при обработке отверстия длиной $L - \Delta$ за два прохода $\sum_{i=1}^2 C_i^{(k)}$ была бы наименьшей (l_1 и l_2 определены выше):

$$l_3 = l_k = 2\Delta, l_1 \text{ и } l_2 \text{ — из условия минимума } \sum_{i=1}^2 C_i^{(k)};$$

$$l_3 = l_k = 3\Delta, l_1 \text{ и } l_2 \text{ — из условия минимума } \sum_{i=1}^2 C_i^{(k)};$$

$$\dots \dots \dots$$

$$l_3 = l_k = L - 2\Delta, l_1 \text{ и } l_2 \text{ — из условия минимума } \sum_{i=1}^2 C_i^{(k)}.$$

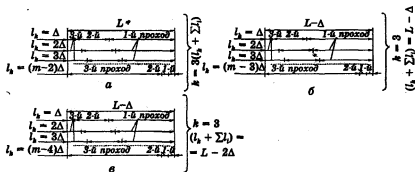


Рис. 13.14. Варианты обработки при $k = 3$

Таким образом, рассчитывают ряд значений $C_3^{(L)}$ при разных l_k (от Δ до $L - 2\Delta$) и соответственно при таких l_1 и l_2 , которые при каждом значении l_k обеспечивают минимальную $\sum_{i=1}^2 C_i^{(k)}$. Из всех полученных $C_3^{(L)}$ выбирают в соответствии с рекуррентным уравнением минимальное значение:

$$C_3^{(L)} = \min \left[C_3^{(k)} + \sum_{i=1}^2 C_i^{(k)} \right].$$

Далее выполняют расчет затрат на обработку за три прохода отверстия уменьшенной длины: $L - \Delta$ (рис. 13.14, б); $L - 2\Delta$ (рис. 13.14, в); $L - (m - 3)\Delta$. Для каждой длины, т.е. для $L - \Delta$, $L - 2\Delta$, ..., находят такое сочетание l_1 , l_2 и $l_3 = l_k$, при котором затраты на обработку минимальны. Эти значения учитываются как $\sum_{i=1}^3 C_i^{(k)}$ при расчете из рекуррентного уравнения величин $C_4^{(L)}$ на следующем, четвертом, шаге.

Расчеты при $k = 4$, $k = 5$, ... повторяются либо до заранее выбранного количества проходов, либо до тех пор, пока величина $C_k^{(L)}$ не начнет возрастать с увеличением k . Из всех рассчитанных $C_k^{(L)}$ при разных k определяется наименьшее. Этому значению соответствуют оптимальные число проходов k , величины l_1, l_2, \dots, l_k и режимы v, S .

Литература

1. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. М.: Машиностроение, 1975.
2. Горанский Г.К. Автоматизация технического нормирования станочных работ на металлорежущих станках с помощью ЭВМ / Г.К. Горанский, Е.В. Владимиров, Л.Н. Ламбин. М.: Машиностроение, 1970.
3. Клушин М.И. Резание металлов: В 3 ч. / М.И. Клушин. Горький: ГПИ, 1970. Ч. 3.
4. Общемашиностроительные нормативы режимов резания для многоцелевых станков фрезерно-сверлильно-расточной группы. М.: ВНИИТЭМР, 1986.
5. Оптимизация режимов обработки на металлорежущих станках / А.А. Гильман, Л.А. Брахман, Д.И. Батищев, Л.К. Матяева. М.: Машиностроение, 1972.
6. Подураев В.Н. Технология физико-химических методов обработки / В.Н. Подураев. М.: Машиностроение, 1985.
7. Рекомендации по рациональной эксплуатации режущего инструмента на токарных станках с ЧПУ. М.: ВНИИТЭМР, 1986.
8. Типовые математические модели и алгоритмы расчета оптимальных режимов одноинструментальной обработки материалов резанием / Е.В. Владимиров [и др.] // Метод. рекомендации Мр119-85. М.: ВНИИНМАШ, 1985.
9. Чураков Е.П. Оптимальные и адаптивные системы / Е.П. Чураков. М.: Энергоатомиздат, 1987.

Современные тенденции в развитии

14.1. процессов резания

В настоящее время все больше деталей машин изготавливается из труднообрабатываемых сталей и сплавов, керамики, композитов и других новых конструкционных материалов. Многие детали характеризуются очень сложной формой, минимальными припусками на обработку, высокими требованиями к качеству обработанных поверхностей. Для обеспечения рациональных условий обработки таких деталей необходим комплексный подход, объединяющий знания о процессах обработки материалов резанием, свойствах материалов, оборудовании и т.д. Баланс между всеми факторами, влияющими на процесс, определяет выбор технологии обработки, а значит, ее стоимость, экологию и ряд других показателей (рис. 14.1). В свою очередь, новая технология оказывает влияние на развитие всех прочих компонентов технологической системы — оборудование, режущий инструмент, технологическую среду (рис. 14.2).

Совершенствование различных технологических процессов обработки резанием обусловлено целым рядом факторов:

1) возрастанием точности обработки и качества обработанной поверхности. Использование новых технологий обработки поверхности инструмента обеспечивает идеальную остроту режущих кромок, в первую очередь алмазных инструментов, что позволяет заменить полирование и притирку резанием. Такая обработка относится к так называемым нанотехнологиям и получила название *сверхточной* [30];

2) повышением скорости резания до максимально допустимого уровня с точки зрения безопасности работы станка. Такой процесс получил название *сверхскоростной обработки* (от англ. high speed cutting — HSC) и сопровождается целым рядом изменений в физических процессах, происходящих в зоне резания. Эти изменения с учетом системного подхода приведены на рис. 14.3. Более подробно закономерности сверхскоростной обработки рассмотрены ниже;

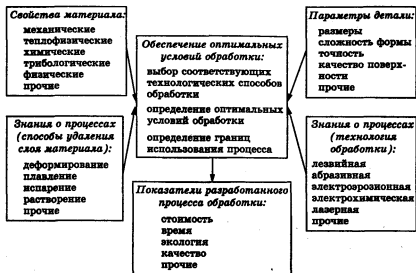


Рис. 14.1. Факторы, определяющие выбор технологии обработки детали

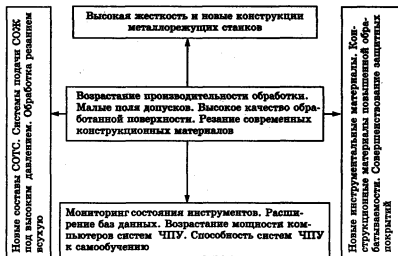


Рис. 14.2. Современные требования к технологическим процессам обработки резанием и элементам технологической системы



Рис. 14.3. Система резания в условиях НСР

3) ограничением использования СОЖ. Затраты на использование и последующую утилизацию СОЖ в современном производстве в несколько раз превышают затраты на режущие инструменты

[10]. Кроме того, СОЖ отрицательно влияют на состояние здоровья человека и окружающую среду. В связи с этим все более широкое распространение получает резание без использования либо с минимальным использованием СОЖ;

4) использованием лезвийной обработки высокотвердых или закаленных материалов вместо шлифования [26]. Такие технологии находят все более широкое применение благодаря расширенному использованию сменных пластин из сверхтвердых материалов (СТМ) и режущей керамики. Современные пластины из СТМ и керамики имеют размеры, полностью соответствующие размерам пластин из твердых сплавов, а значит, не требуют специальных оправок, способов крепления и т.д. Данный способ обработки существенно улучшает экологический аспект производства. Например, при лезвийной обработке 5000 шестерен образуется около 50 кг стружки, которую в чистом и сухом виде легко подвергнуть переработке. Однако при шлифовании такой партии деталей необходимо дополнительно иметь до 8 т СОЖ, а в дальнейшем обеспечить утилизацию значительного количества шлама [22], что требует больших затрат.

Вследствие все более широкого применения новых конструкционных и инструментальных материалов, способов обработки, их высокой стоимости и высокой оплаты труда большое внимание в настоящее время уделяется минимизации экспериментальных исследований путем использования различных видов компьютерного моделирования. Такие технологии получили специфическое название «*компьютерное резание*» [21] и основаны на детальном знании не только физических закономерностей процесса резания, но и изменений свойств контактирующих материалов. Такая информация получила название «*know-how on machining*». В настоящее время разработаны модели, позволяющие реализовать на компьютере практически все физические явления процесса резания:

□ визуализировать процессы образования стружки, в том числе со скоростями до 1800 м/мин;

□ визуализировать процессы движения стружки по передней поверхности, ее завивания и ломания;

□ рассчитывать силы резания, контактные нагрузки и распределение напряжений в зоне сдвига, на контактных площадках инструмента и поверхностных слоях детали для различных видов обработки, в том числе нестационарной и прерывистой;

□ моделировать тепловые поля и рассчитывать температуры в зоне сдвига, на контактных площадках инструмента и поверхностных слоях детали для различных видов обработки;

□ определять возможные износы инструментов и вероятность их разрушения при различных условиях обработки и т.д.

Анализ возможностей использования того или иного технологического способа обработки конкретной детали основывается прежде всего на оценке обрабатываемости ее материала с учетом требований по обеспечению точности, качества обработки и т.п. Известно, что для каждого способа обработки существуют границы, за которыми его использование не целесообразно. Расширить эти границы можно, изменяя: 1) свойства обрабатываемого материала в зоне реализации процесса обработки; 2) характер физико-химических процессов в зоне обработки.

Определяющим условием расширения традиционных границ обработки является введение в зону обработки дополнительной энергии, которая либо поступает извне, либо остается после предыдущих технологических операций (табл. 14.1).

Таблица 14.1

Способы обработки с вводом дополнительной энергии в зону обработки

Исходный вид энергии	Дополнительный вид энергии			
	Механическая	Тепловая	Химическая	
Механическая	Резание с наложением ультразвуковых колебаний	Сверхскоростная обработка	Резание с подогревом	Анодно-механическое шлифование; возможность электрохимической правки шлифовального круга
Тепловая	Электроэрозионная обработка с наложением ультразвуковых колебаний	—	—	Лазерная обработка со сжиганием и последующим выдуванием материала
Химическая	Электрохимическое шлифование	—	Объединение электрохимической и электроэрозионной обработки	—

Использование комбинаций энергии различных видов не только обеспечивает эффективное решение современных технологических проблем, но и вызывает существенные изменения в характере физико-химических процессов, имеющих место в зоне обработки. Некоторые из перспективных технологических процессов обработки резанием рассмотрим более подробно.

Резание с наложением дополнительных колебаний

Проблемы развития современного производства связаны с поиском новых способов обработки различных материалов. Это обусловлено возросшими требованиями к физико-механическим свойствам материалов (прочности, износостойкости, теплостойкости и др.), усложнением конструкции деталей, ростом темпов производства.

Процесс вибрационного резания заключается в том, что на принятую на данной операции кинематическую схему обработки накладывается дополнительное вибрационное движение инструмента или заготовки. Общие закономерности этого процесса таковы [5]:

□ кратковременное периодическое изменение мгновенных скоростей v_z и углов резания α_z, γ_z :

$$v_z = v_0 \pm \Delta v_z = v_0 \pm 60A\omega/1000 = v_0 \pm 0,12\pi fA;$$

$$\alpha_z = \alpha_0 - \Delta\alpha_z - \Delta\alpha_z \cos\omega\tau; \quad \gamma_z = \gamma_0 + \Delta\gamma_z + \Delta\gamma_z \cos\omega\tau,$$

где A — амплитуда вибраций; ω — круговая частота вибраций; f — частота вибраций; α_0, γ_0 — углы заточки инструмента; $\Delta\alpha_z, \Delta\gamma_z$ — кинематические изменения углов α_0 и γ_0 в результате движения подачи; $\Delta\alpha_z, \Delta\gamma_z$ — амплитуды изменения углов при наложении вибраций; τ — время;

□ переменные циклические нагрузки на обрабатываемый материал, обусловленные переменными скоростями и углами резания;

□ снижение коэффициентов и сил трения на площадках контакта инструмента со стружкой и обрабатываемой деталью;

□ повышенная эффективность применения СОТС в результате их лучшего проникновения на контактные площадки и надежного омыwania режущего клина при выходе инструмента из контакта с обрабатываемым материалом.

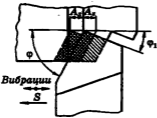
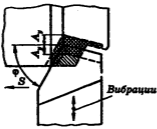
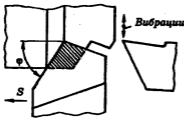
Отмеченные особенности резания улучшают условия работы инструмента. В результате действия принудительных колебаний снижается уровень сил и температур резания. Процесс резания превращается из непрерывного в прерывистый. При этом изменяются условия стружкообразования, а режущие кромки получают возможность периодического отдыха вследствие кратковременного уменьшения или снятия нагрузок. Отпадает также необходимость в стружколомающих уступах и лунках, ослабляющих режущее лезвие. Действие этих положительных факторов при оптимальных

условиях обработки превалирует над отрицательными, среди которых следует отметить переменную нагрузку на режущие кромки, возрастание высоты микронеровностей обработанной поверхности и снижение долговечности некоторых узлов станка.

В общем случае на обычные движения при механической обработке могут накладываться осевые, радиальные и тангенциальные колебания, а также колебания, действующие в любом другом направлении. Об эффективности колебаний можно судить на основании табл. 14.2.

Таблица 14.2

Схемы и области применения принудительных колебаний

Схема	Области применения
	<p>Осевые колебания используются для дробления стружки, обеспечивая получение шероховатости обработанной поверхности $Ra \geq 2,5$ мкм. Точность обработки и период стойкости инструмента те же, что и при обычном резании. Основная особенность — значительное изменение толщины среза и рабочих углов резания за один цикл колебаний</p>
	<p>Радиальные колебания значительной амплитуды отрицательно сказываются на процессе резания. Перемещение режущей кромки непосредственно копируется на обработанной поверхности, резко увеличивая ее шероховатость. Значительные нагрузки на вершину инструмента приводят к выкрашиванию режущих кромок и повышенному износу. В связи с этим радиальные колебания используют только в диапазоне ультразвуковых частот</p>
	<p>Тангенциальные колебания используются для повышения производительности обработки и периода стойкости режущего инструмента при резании труднообрабатываемых материалов</p>

Практические результаты от наложения дополнительных колебаний сводятся к обеспечению гарантированного стружкодробления или улучшению обрабатываемости материала. В первом случае достаточно иметь частоту вынужденных колебаний не выше 50 Гц. Это достигается при использовании механических, пневматических или гидравлических вибраторов [5] либо модулированием подачи на станках с ЧПУ (см. гл. 12). Во втором случае необходимы высокочастотные колебания, генерируемые пьезоэлектрическими, магнитострикционными, электрогидравлическими и другими вибраторами [4, 5].

Резание с наложением ультразвуковых колебаний хорошо рекомендовало себя при обработке керамики. Так, при точении стеклокерамики колебания резца с частотой 20 кГц и амплитудой до 10 мкм вызывают интенсивное образование микротрещин непосредственно перед режущим лезвием, что существенно снижает прочность обрабатываемого материала. Как следствие, наблюдается снижение силы резания до 50 % при одновременном повышении стойкости резца до 20 раз по сравнению с традиционным резанием [33].

Аналогичные результаты наблюдаются при сверлении керамики. Имеет место раздробление стружки, значительное снижение сил сверления, отсутствие или резкое сокращение образования микротрещин и иных поверхностных дефектов [28]. При этом более эффективно одновременное наложение колебаний как на инструмент, так и на обрабатываемую деталь [31].

14.3. Резание с подогревом

Одним из путей интенсификации процессов резания является искусственный подогрев срезаемого слоя заготовки до определенной температуры. Принципиальная идея обработки с подогревом заключается в использовании температурного закона сопротивления материала пластической деформации:

$$M_2 = M_1 e^{-\alpha_\Theta(\Theta_2 - \Theta_1)},$$

где M_1 , M_2 — механическая характеристика обрабатываемого материала, определяющая его сопротивление пластической деформации при меньшей (Θ_1) и большей (Θ_2) температурах; α_Θ — коэффициент, зависящий от свойств обрабатываемого материала и условий деформирования.

Согласно этому закону нагрев во всех случаях снижает сопротивление металла пластической деформации, что широко используется при обработке металлов давлением. Аналогичный эффект нагрев обеспечивает и при обработке резанием. В частности, при обработке легированных и высокопрочных сталей отмечается снижение уровня сил и мощности резания на 30...70 % (рис. 14.4, а), увеличение периода стойкости инструмента в 4–40 раз (рис. 14.4, б); в ряде случаев элементная стружка переходит в сливную [3, 5].

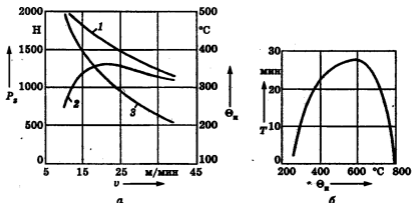


Рис. 14.4. Характеристики процесса резания с подогревом [3]: а — зависимость составляющей P_z силы резания и температуры нагрева Θ_n от скорости резания при точении стали 110Г13Л; б — зависимость периода стойкости реза из твердого сплава Т5К10 от температуры нагрева сплава 35КХ6Ф; 1 — P_z без нагрева; 2 — P_z с нагревом; 3 — Θ_n

Температура в зоне резания является одним из основных факторов, определяющих интенсивность изнашивания инструмента (см. гл. 7). При резании с подогревом необходимо учитывать, что температура контактирующих слоев инструментального и обрабатываемого материалов складывается из температуры нагрева Θ_n и температуры резания Θ_p , обусловленной выделением теплоты в процессе резания: $\Theta_z = \Theta_n + \Theta_p$. Поэтому Θ_n необходимо подбирать с учетом скорости резания (см. рис. 14.4, а) таким образом, чтобы Θ_z обеспечивала минимальную интенсивность изнашивания режущего инструмента. В частности, при резании твердосплавным инструментом уровень температуры влияет на интенсивность адгезионного и диф-

фузионного изнашивания (рис. 14.5). Значение Θ_z определяется по минимуму кривой суммарной интенсивности изнашивания, т.е. по максимуму зависимости $T = f(\Theta_z)$.

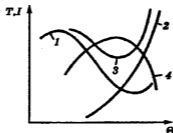


Рис. 14.5. Зависимость интенсивности адгезионного (кривая 1), диффузионного (кривая 2), суммарного (кривая 3) изнашивания и периода стойкости T (кривая 4) от температуры резания

Резание с подогревом дает положительный эффект только в тех случаях, когда разупрочнение обрабатываемого материала превалирует над разупрочнением рабочих поверхностей инструмента. Во всех случаях при выборе температуры нагрева не следует назначать температуры, вызывающие в обрабатываемом материале структурные превращения.

Резание с подогревом наиболее эффективно при черновой обработке с большой глубиной резания. При этом используют два способа нагрева — сплошной и локальный. Сплошной нагрев производят в печах или используя теплоту предыдущих заготовительных операций (литья, прокатки, штамповки). К способам локального нагрева относится индуктивный (с помощью токов высокой частоты), электродуговой и электроконтактный. В последнем случае нагрев осуществляется пропусканием электрического тока через инструмент или специальные электроды. В последние годы широкое распространение получил плазменный нагрев материала. Его преимуществом является возможность согласованного воздействия плазматрона и режущего инструмента на материал срезаемого слоя. В частности, можно строго регулировать глубину нагрева, сохраняя температуру подповерхностных слоев значительно ниже температуры начала структурных превращений [6].

Плазменный нагрев (рис. 14.6) осуществляется горелкой, в которой происходит ионизация вихревого потока сжатого рабочего газа, например смеси водорода с аргоном, под действием электри-

ческого поля и высокой температуры при возникновении электрической дуги между вольфрамовым катодом и соплом горелки (анодом). В зависимости от температуры плазмы, диаметра ее струи и расстояния горелки от нагреваемой поверхности можно обеспечить прогрев поверхностного слоя детали на определенную глубину.

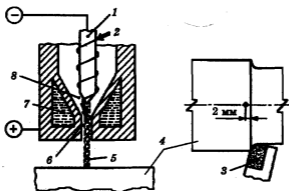


Рис. 14.6. Схема действия плазменной горелки:

- 1 — вольфрамовый электрод (катод); 2 — поток рабочего газа;
3 — деталь; 4 — резец; 5 — поток плазмы; 6 — сопло (анод);
7 — система водяного охлаждения сопла; 8 — камера горелки

Аналогичным образом осуществляется резание с лазерным подогревом. Высокая плотность энергии лазерного излучения, простота регулирования температуры, площади нагрева и глубины проникания теплового излучения, небольшие мощности твердотельных лазеров сделали их использование наиболее перспективным при обработке с подогревом. Эта технология весьма эффективна при обработке жаропрочных сплавов и конструкционной керамики, например Si_3N_4 . Такая керамика теряет свои прочностные свойства при температурах около 1000°C , что позволяет обрабатывать ее алмазными резцами, обеспечивая шероховатость обработанной поверхности $Ra < 0,3$ мкм и стойкость реза до 3 ч. В настоящее время лазер не является отдельным устройством, а встраивается непосредственно в металлорежущий станок с ЧПУ (рис. 14.7) и работает в соответствии с управляющей программой.

Нагрев оказывает весьма существенное влияние на условия обработки таких материалов, как керамика Si_3N_4 . В зависимости от уровня температур можно выделить три области, в которых имеют

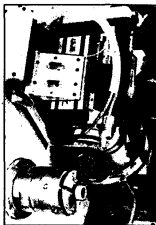


Рис. 14.7. Использование лазерного подогрева на токарном станке с ЧПУ со встроенным полупроводниковым лазером [15]

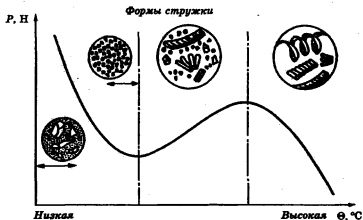


Рис. 14.8. Влияние температуры нагрева детали на характер стружкообразования и уровень сил при резании керамики Si_3N_4 [29]

место значительные различия в уровне сил резания и форме стружки (рис. 14.8). В диапазоне температур менее $1100\text{...}1200\text{ }^\circ\text{C}$ наблюдаются хрупкое разрушение обрабатываемого материала, весьма значительные силы резания и износ режущих инструментов, что делает обработку практически невозможной. В случае приближе-

ния температуры к некоторому граничному значению силы резания минимизируются, образуются стружки в виде мелких сферических частиц. При температурах 1200...1300 °С наблюдаются одновременно хрупкое разрушение и пластическое деформирова-

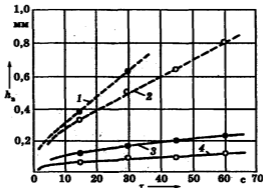


Рис. 14.9. Динамика изнашивания резцов из сверхтвердых материалов при обработке керамики Si_3N_4 :

- 1, 3 — поликристаллический материал на основе нитрида бора;
 2, 4 — поликристаллический алмаз типа «карбонадо»
 (1, 2 — обычное резание; 3, 4 — резание при температуре 1050 °С;
 $v = 10$ м/мин; $S = 0,05$ мм/об; $t = 0,2$ мм) [16]

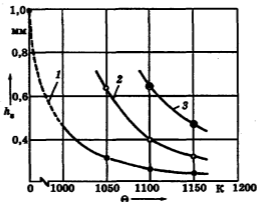


Рис. 14.10. Влияние температуры резания на износ алмазных резцов при обработке керамики Si_3N_4 :

- 1 — $v = 10$ м/мин; 2 — $v = 30$ м/мин; 3 — $v = 60$ м/мин;
 $S = 0,05$ мм/об; $t = 0,2$ мм; $\tau = 1$ мин [16]

ние обрабатываемого материала. Образуются стружки скалывания и лентовидные сливные, характерные для обработки пластических материалов, а также стружки надлома. Силы резания возрастают, поскольку пластическое деформирование материала требует больших затрат энергии, чем его хрупкое разрушение. В зоне температур свыше $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ формируются лентовидные и спиральные сливные стружки, силы резания снижаются в связи с некоторым размягчением керамики.

Нагрев керамики при обработке изменяет соотношение главной и радиальной сил резания. Если при обычном резании сила P_y превышает силу P_x , то при резании с подогревом это соотношение изменяется на противоположное (аналогично случаю обработки пластичных материалов, дающих сливную стружку).

При фрезеровании труднообрабатываемых материалов с лазерным подогревом силы резания снижаются более чем в 2 раза, износ фрезы меньше в 2 раза, производительность увеличивается в 3 раза.

Весьма положительно влияет подогрев керамики в ходе ее обработки на интенсивность изнашивания режущих лезвий инструментов (рис. 14.9, 14.10). Шероховатость обработанной поверхности при резании с подогревом уменьшается в 5 и более раз.

14.4. Сверхскоростное резание

Общие сведения. Идею сверхскоростного резания высказал еще в 30-х гг. прошлого века С. Salomon. Согласно ей при резании на очень высоких скоростях температура в зоне резания должна резко снижаться за счет изменения условий теплоотвода; в итоге при сверхвысоких скоростях она будет близка к температуре, возникающей при традиционных условиях резания (рис. 14.11). Именно с этого времени начинаются исследования в области HSC.

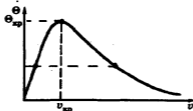


Рис. 14.11. Характер влияния скоростей резания на температуру (по С. Salomon)

Вместе с тем понятие HSC даже в настоящее время не до конца определено, разные авторы вкладывают в этот термин разные понятия. Приближенная классификация таких видов обработки согласно [8] приведена в табл. 14.3.

Таблица 14.3

Диапазоны скоростей и используемое оборудование

Условия резания	Диапазон скоростей, м/мин	Тип оборудования
Обычное	До 600 (для легких сплавов до 1800)	Обычное
Высокоскоростное	До 18 000	Станки с повышенной жесткостью и мощностью электродвигателя привода главного движения, оснащенные специальными шпиндельными узлами и устройствами ЧПУ; частота вращения шпинделя до 60 000 об/мин
Баллистическое	Свыше 10 000	Установки, использующие для обеспечения движения резания взрывчатые вещества (ракеты, ружья, пушки), электромагнитные поля, ускорение свободного падения (копровые установки большой высоты)

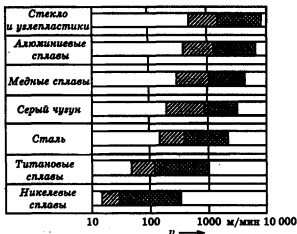


Рис. 14.12. Уровни скоростей резания при обработке различных материалов [24]: светлый фон — зона традиционных скоростей; косая штриховка — переходная область; сетчатая штриховка — зона HSC

Иная классификация [24, 25] более универсальна, поскольку разработана с учетом обрабатываемости различных материалов (рис. 14.12). Например, растачивание отверстий и фрезерование блоков автомобильных двигателей из силумина производят со скоростями 7000 и 8000 м/мин, развертывание — 1000 м/мин. В соответствии с такой классификацией обработка никелевых сплавов со скоростями свыше 50 м/мин уже является сверхскоростной, поскольку эти скорости на порядок превышают традиционные.

Сверхскоростное резание имеет целый ряд преимуществ по сравнению с резанием на традиционных скоростях (табл. 14.4).

Таблица 14.4

Достоинства, условия и области использования НСР

Достоинства	Условия применения	Области использования
Высокая производительность	Обработка деталей из сталей, чугунов, легких сплавов	Изделия аэрокосмической промышленности, производство литейных форм и пресс-форм для объемной обработки
Высокие качество и точность обработанной поверхности	Прецизионная обработка	Оптическая промышленность, приборостроение, турбиностроение
Малые силы резания	Обработка тонкостенных (нежестких) деталей	Авиационная, космическая, автомобильная промышленность, бытовое машиностроение (производство стиральных машин, пылесосов и т.д.)
Высокие частоты возникающих в зоне резания колебаний	Обработка труднообрабатываемых материалов без вибраций	Приборостроение и оптическая промышленность
Практически полный отвод теплоты в стружку	Низкие температуры в зоне резания; отсутствие тепловых деформаций	Обработка деталей из магнитных сплавов, прецизионное приборостроение

В связи с чрезвычайно высокими скоростями протекания физических процессов в зоне резания их закономерности в условиях НСР в значительной степени отличаются от традиционных. Рассмотрим некоторые из них.

Стружкообразование и явления на контактных площадках. Изменения закономерностей стружкообразования при НСР обусловлены известным теоретическим положением физики твердого тела, согласно которому при увеличении скорости пластической деформации металла область последней уменьшается и металл стано-

вится более хрупким; вследствие этого уменьшается относительная работа пластической деформации.

Скорость резания при HSC оказывает весьма существенное влияние на процесс формирования стружки, поскольку эластопластические свойства материала зависят от времени действия и температуры. При относительно низких скоростях резания вся зона первичных пластических деформаций находится практически в равных условиях. По мере роста скорости возрастают температура и ее градиент, снижая эффект упрочнения обрабатываемого материала. При сверхвысоких скоростях могут возникнуть адиабатические условия протекания процессов деформирования [14, 27]. При достижении баланса между эффектами упрочнения и разупрочнения образуется стружка в виде отдельных сегментов.

Из представленных фотографий (рис. 14.13) легко заметить, что такое обоснование соответствует описанным в гл. 3 условиям процесса формирования сегментированной стружки и приемлемо для самого широкого круга обрабатываемых материалов — конструкционных и закаленных сталей, цветных сплавов и др.

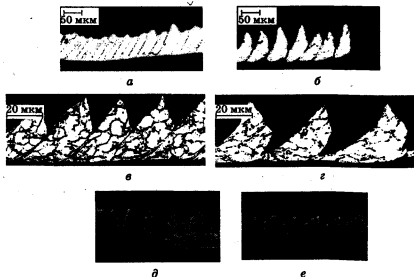


Рис. 14.13. Стружки, полученные при сверхскоростном резании: а — алюминиевого сплава AlZnMgCu1,5, $v = 1000$ м/мин; б — то же, $v = 7000$ м/мин, $S_z = 0,2$ мм/зуб [19]; в — титанового сплава Ti6Al4V, $v = 1200$ м/мин; г — то же, $v = 4800$ м/мин, $\gamma = 0^\circ$ [23]; д — углеродистой стали С40 НВ 180, 750 м/мин; е — то же, $v = 11\,500$ м/мин [14]

Зона первичных пластических деформаций при сверхскоростном резании очень узкая, стружка контактирует с передней поверхностью инструмента на крайне малом участке непосредственно за режущей кромкой. Подтверждением служит возрастание нормальных контактных напряжений на передней поверхности по мере роста скорости резания (рис. 14.14), тогда как при обычном резании они снижаются.

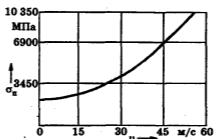


Рис. 14.14. Влияние скорости на нормальные контактные напряжения при сверхскоростном резании стали AISI 4340 [11]

Материал образующихся сегментов стружки практически не подвергается деформированию, за исключением очень тонкого слоя, соединяющего сегменты. Да и сам этот слой имеет весьма малую степень упрочнения; зато характеризуется появлением микротрещин, предшествующих разделению стружки скалывания на отдельные элементы. Особенно это характерно для материалов, изначально имеющих низкие пластические свойства: титановых сплавов (рис. 14.15) и закаленных сталей.



Рис. 14.15. Корни стружек при сверхскоростном резании титанового сплава Ti6Al4V:

$a - v = 600$ м/мин; $b - v = 1200$ м/мин [12]

При достижении температур, близких к температуре плавления, наблюдается разделение сегментов стружки [14]. При резании закаленных сталей в ряде случаев зафиксирована порошкообразная стружка [8].

Коэффициент укорочения стружки при сверхвысоких скоростях для широкого круга обрабатываемых материалов значительно меньше, чем при обычном резании. В ряде случаев он может быть меньше единицы при одновременном уменьшении ширины стружки (рис. 14.16).

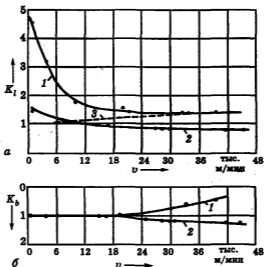


Рис. 14.16. Зависимость коэффициентов укорочения K_1 (а) и уширения K_b (б) стружки от скорости резания: 1 — алюминий, $\gamma = -15^\circ$; 2 — алюминий, $\gamma = 45^\circ$; 3 — сталь 50, $\gamma = 0^\circ$

Как уже отмечалось (см. гл. 3), достоверные значения коэффициентов деформации стружки можно получить только при учете ее сегментарного характера. Такой анализ, выполненный в [12], зафиксировал отдельные сегменты скалывания толщиной d и шагом p в срезаемом слое перед зоной первичных пластических деформаций, а также в стружке толщиной $d_{\text{сег}}$ и шагом $p_{\text{сег}}$ (рис. 14.17, а).

Учитывая приведенные ранее соотношения, коэффициент утолщения стружки можно рассчитать следующим образом:

$$K_a = \frac{\bar{a}_c}{a} = \frac{p}{p_{\text{свр}}} = \frac{\cos(\Phi - \gamma)}{\sin \Phi},$$

где \bar{a}_c — средняя толщина стружки; a — толщина срезаемого слоя; Φ — угол скалывания; γ — передний угол.

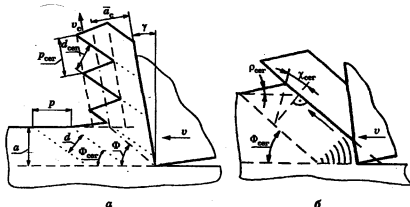


Рис. 14.17. Схема образования стружки (а) и размеры ее сегментов (б) при сверхскоростном резании [12]

Угол наклона плоскости сегментации $\Phi_{\text{свр}}$ можно рассчитать из соотношения

$$K_a = \frac{p}{p_{\text{свр}}} = \frac{d \cos(\Phi_{\text{свр}} - \gamma)}{d_{\text{свр}} \sin \Phi_{\text{свр}}}$$

На завершающей стадии формирования сегмента $\Phi_{\text{свр}} \approx \Phi$. Соотношения основных размеров сегмента (рис. 14.17, б) имеют вид

$$\text{tg} \chi_{\text{свр}} = \frac{\sin \rho_{\text{свр}}}{\sin \Phi_{\text{свр}} \sin(\Phi_{\text{свр}} + \rho_{\text{свр}})}$$

Ранее отмечалось, что реальный угол сдвига в традиционных условиях резания значительно меньше угла, обеспечивающего минимальный относительный сдвиг (для сливного стружкообразования — 45°). В условиях сверхскоростного резания для различных обрабатываемых материалов угол сдвига колеблется относительно этой теоретической величины (рис. 14.18), а иногда достигает 60° [8]. Такой характер стружкообразования обусловлен особенностями трения на передней поверхности, динамическими изменениями физико-механических свойств обрабатываемого металла и условиями протекания микродеформаций.

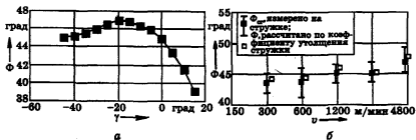


Рис. 14.18. Изменения угла сдвига при сверхскоростном резании:

а — закаленной хромистой стали 100Cr6 HRC 63 [19];

б — титанового сплава Ti6Al4V [12]

Силы и мощность резания. Весьма важную роль в физических процессах в зоне резания при сверхскоростной обработке играют силы инерции. В условиях обычного резания они совершенно незначительны, при сверхскоростном — составляют до 30...50 % от P_r . Для расчетов силы инерции можно воспользоваться формулой [17]

$$P_{\text{и}} = \frac{\rho v^2 a b \cos \gamma}{\cos(\Phi - \gamma)} = \frac{\rho v^2 S t \cos \gamma}{\cos(\Phi - \gamma)},$$

где ρ — плотность обрабатываемого материала; v — скорость резания; a , b — соответственно толщина и ширина среза; γ — передний угол; Φ — угол сдвига; S — подача; t — глубина резания.

Для случая течения легированной стали твердосплавным резцом можно получить значения сил, приведенные в табл. 14.5.

Таблица 14.5

Влияние скорости резания на силу резания и силу инерции при точении

Скорость резания, м/мин	Сила резания, Н (согласно [9])	Сила инерции, Н
60	1700	7
120	1550	25
180	1460	57
300	1350	158
600	1200	700
1200	1100	2 860
3000	960	20 600
6000	870	89 300

Предварительные расчеты показывают, что приращение энергии под действием этих сил составляет около 10 % от общей энергии резания при скоростях 10 000 м/мин и практически равно этой мощности при 30 000 м/мин [24].

Приведенные на рис. 14.19 зависимости $P_z = f(v)$ подтверждают мнение о том, что для более прочных материалов минимум силы резания будет смещаться в зону более высоких скоростей [7], поскольку в этом случае выше уровень сил резания и инерционная составляющая начинает сказываться при более высоких скоростях.

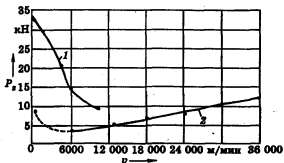


Рис. 14.19. Зависимость силы резания от скорости:
1 — стали 45; 2 — при резании алюминия

Ранее (см. гл. 5) отмечалось, что затраты энергии на резание определяются уровнем удельных сил резания. Эти силы по мере роста скорости резания снижаются (рис. 14.20), хотя в целом их уровень выше по сравнению с традиционным резанием (для сплава Ti6Al14V 1400...1700 МПа). Минимальные значения сил наблюдаются при максимальных подачах и скоростях резания, что также подтверждает эффект охрупчивания обрабатываемого материала. Снижение удельных сил приводит к снижению мощности резания, хотя в целом она весьма значительна. По данным фирмы «Локхид» (США), при обработке стали 45 при $t = 5$ мм, $S = 0,3$ мм/об, $v = 120$ м/мин мощность резания равна 6,47 кВт, а при $v = 10\ 000$ м/мин — 161 кВт [8].

Температура резания. Как отмечалось, при сверхскоростном резании, начиная с критического значения $v_{кр}$, происходит снижение температуры (см. рис. 14.11). Это объясняется тем, что, начиная с критических значений скорости резания, отделение срезаемого слоя происходит в результате не пластического, а хрупкого

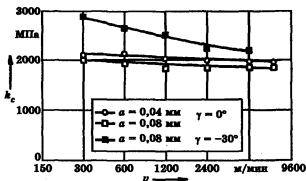


Рис. 14.20. Удельные силы резания при сверхскоростном точении титанового сплава Ti6Al4V [12]

разрушения. Наблюдается локализация пластических деформаций в малых объемах и интенсивный разогрев контактных слоев, приводящий к снижению сил трения. На рис. 14.21 показано, что при скорости резания 4700 м/мин, глубине 3 мм и подачах менее 1500 мм/мин температура стружки при фрезеровании достигает температуры плавления металла. Эта стружка обладает таким запасом энергии, что сразу же после образования приваривается к поверхности детали или сплавляется с ней. Если подача превышает 2500...3000 мм/мин, температура заготовки поднимается на 6 °С выше комнатной и теплота, возникающая в процессе резания, отводится вместе со струж-

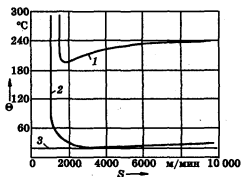


Рис. 14.21. Влияние скорости резания на температуру: 1 — температура стружки при фрезеровании; 2 — температура заготовки; 3 — комнатная температура

кой, температура которой не превышает 240 °С [20]. Однако условия теплоотвода могут меняться, и тогда температура стружки остается чрезвычайно высокой (рис. 14.22).

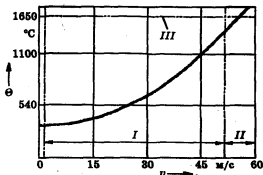


Рис. 14.22. Изменения температуры стружки при сверхскоростном резании хромомолибденовой стали AISI 4340: I — зона оплавления поверхностных слоев стружки; II — зона полного оплавления стружки; III — температура плавления стали [11]

Температура режущей части инструмента возрастает с увеличением скорости резания, хотя и в значительно меньшей степени (рис. 14.23). В ряде случаев высока также температура на поверхности детали. Так, при сверхскоростном точении закаленных сталей зафиксировано появление «белого слоя» в поверхностных слоях детали, который свидетельствует не только о чрезвычайно высоких деформациях (см. § 3.3), но и возможных фазовых превращениях (рис. 14.24).

Изнашивание и стойкость инструмента. Специфика механизма изнашивания инструмента связана с высокими температурами на площадках контакта и малым временем контактирования. Отсутствие нароста, застойной зоны и упрочнение металла в зоне пластического контакта повышают интенсивность адгезионных и диффузионных процессов; возникает значительный износ контактных площадок вблизи режущей кромки. Динамика и интенсивность изнашивания при обычных и сверхвысоких (больших в 300 раз) скоростях при прочих равных условиях может быть примерно одинаковой или несколько более высокой в последнем случае (рис. 14.25) [20, 27]. Зависимости $T = f(v, S)$ могут иметь перегиб (рис. 14.26), положение которого определяется свойствами обрабатываемого материала и условиями обработки.

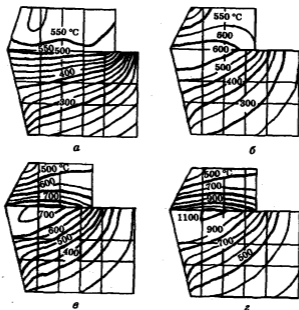


Рис. 14.23. Результаты моделирования тепловых полей в режущем инструменте и образующейся стружке при обработке стали 45 со скоростями [22]: а — 100 м/мин; б — 400 м/мин; в — 800 м/мин; г — 1600 м/мин



Рис. 14.24. Появление «белого слоя» в зоне резания [19]

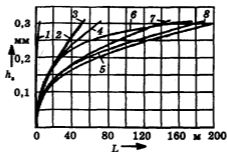


Рис. 14.25. Кривые износа при фрезеровании силумина G-AlSi12(Cu) однозубой концевой фрезой ($v = 2500$ м/мин; $S_m = 9$ м/мин; $t = 3$ мм; $B = 1,5$ мм) [24]:

- 1 — быстрорежущая сталь; 2 — пластина из твердого сплава P20/30; 3 — пластина из твердого сплава P30/40; 4 — пластина из твердого сплава P40; 5 — пластина из твердого сплава K30/40; 6 — пластина из твердого сплава K10-F; 7 — пластина из твердого сплава K10 с покрытием; 8 — пластина из твердого сплава K10

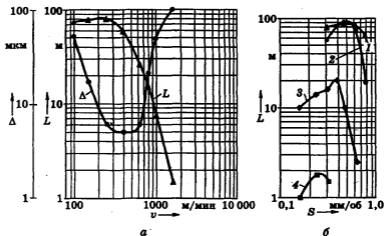


Рис. 14.26. Зависимости пути резания L и глубины Δ лунки на передней поверхности от скорости резания (а) и подачи (б) при фрезеровании стали Sk45 (пластина из твердого сплава P20/25; $t = 5$ мм; $B = 1,5$ мм) [22]:
1 — $v = 250$ м/мин; 2 — $v = 400$ м/мин; 3 — $v = 800$ м/мин; 4 — $v = 1600$ м/мин

Для обеспечения высокой стойкости режущие инструменты оснащаются сменными пластинами из твердых сплавов с многослойными покрытиями минералокерамикой и сверхтвердыми материалами. Для уменьшения дисбаланса корпуса вращающихся инструментов выполняются из легких сплавов [22].

При сверхскоростной обработке в значительной степени изменяются подходы к использованию СОЖ. Исследования показывают, что в таких условиях более эффективно резание всухую либо с подводом газовой среды (рис. 14.27).

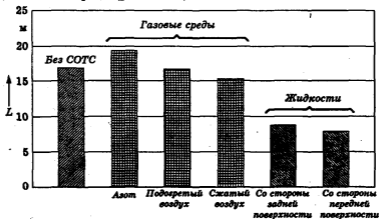


Рис. 14.27. Влияние технологической среды на путь резания при фрезеровании стали Сk45 ($v = 800$ м/мин; $S_z = 0,31$ мм/зуб; $t = 5$ мм; $B = 1,5$ мм; пластина из твердого сплава P20/25) [22]

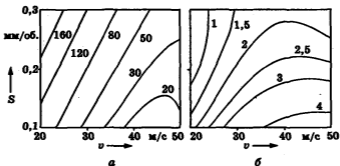


Рис. 14.28. Влияние скорости и подачи на объем снятого металла, см^3 , при износе реза 0,2 мм (а) и отношении износа к объему снятого металла (б) при сверхскоростном точении углеродистой стали С40 [14]

Производительность обработки. Производительность обработки, как известно, определяется соотношением уровней скоростей резания, подачи и периода стойкости инструмента. Исследования показывают, что при сверхскоростной обработке наибольший съем металла при постоянной стойкости и минимальный относительный объемный износ обеспечиваются при значительных подачах и меньшей скорости резания (рис. 14.28).

В связи с резким возрастанием скоростей резания реальная производительность обработки чрезвычайно велика; при равной точности она может быть в 1,5–4 раза выше, чем у шлифования. На практике применяются станки, обеспечивающие съем металла до $4000 \text{ см}^3/\text{мин}$ или 25...30 кг [8]. Баллистическое резание позволяет повысить съем до $100\,000 \text{ см}^3/\text{мин}$ [10] и даже до $950\,000 \text{ см}^3/\text{мин}$ [20].

14.5. Резание всухую

Смазочно-охлаждающие жидкости в последние годы все чаще рассматриваются как нежелательный фактор в производстве. Это обусловлено экономическими и экологическими причинами, в том числе все более жестким международным законодательством об охране окружающей среды [13, 22].

Согласно имеющимся данным [10, 13, 22], в крупносерийном производстве (автомобильная промышленность) на долю действий, связанных с применением СОЖ (доставка, использование, регенерация и т.д.), приходится от 7,5 до 17 % общих производственных затрат, тогда как расходы на инструмент составляют только 4 %. Весьма значительны затраты на последующую утилизацию и регенерацию СОЖ. В частности, в середине 90-х гг. прошлого века в Германии в течение года на утилизацию отправляли свыше 750 000 т СОЖ при затратах до 1500 марок на утилизацию одной тонны, причем затраты эти непрерывно возрастали.

Важную роль играют также экологические последствия от использования СОЖ. С одной стороны, учитывается их отрицательное влияние на окружающую среду, с другой — вредное воздействие на здоровье работников. В результате применения СОЖ возрастает угроза кожных (до 30 % всех профессиональных заболеваний [22]), аллергических и онкологических заболеваний вследствие контакта человека с канцерогенными веществами (ароматическими углеводородами, оксидами и мылами металлов, продуктами бактерицидного разложения и т.д.).

Известно, что резание всухую приводит к повышению температуры и, как следствие, ускоренному изнашиванию инструмента, возрастанию термических напряжений в детали, ее тепловым деформациям и прочим отрицательным последствиям. Эти воздействия можно уменьшить следующим образом (рис. 14.29):

- выбирая технологию обработки, не требующую использования СОЖ;
- изменяя конструкцию и геометрию инструмента (размеры поверхностей, контактирующих с деталью и стружкой);
- используя износостойкие покрытия, препятствующие поступлению теплоты в инструмент;
- подбирая марки инструментальных материалов с повышенными теплостойкостью и теплопроводностью;

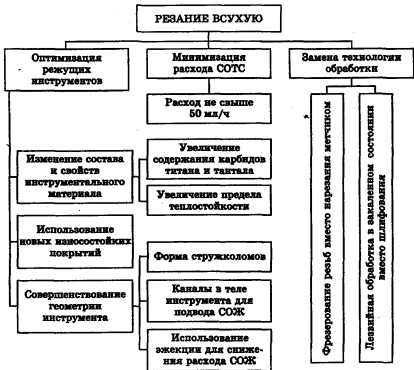


Рис. 14.29. Средства, позволяющие осуществлять резание без либо с минимальным использованием СОЖ

□ используя твердые, газообразные смазочные вещества либо СОЖ с минимальным расходом (менее 100 мл/ч) в распыленном состоянии.

Применение СОЖ в малых количествах не требует значительных затрат на ее очистку и утилизацию, но в то же время обеспечивает снижение коэффициентов трения и адгезии на контактных площадках. Мелкую стружку и пыль из зоны резания можно удалить с помощью сжатого воздуха. При этом нагретая стружка не накапливается в поддоне и не передает свою теплоту металлорежущему станку, не остается на зажимных элементах приспособления, не вызывает ускоренного изнашивания направляющих станка.

Основная проблема при резании всухую — правильный выбор инструментального материала с учетом специфики процесса обработки. Например, при обработке сталей главной проблемой является высокая температура резания, при обработке чугуна и силуминов — интенсивное абразивное изнашивание инструмента, при обработке алюминия — склонность стружки к схватыванию с инструментом и деталью. Различия между резанием всухую и с использованием СОЖ зависят также от вида обработки (рис. 14.30). Легко заметить, что максимальный эффект от сухой обработки наблюдается при фрезеровании, поскольку прерывистое резание способствует охлаждению лезвий фрезы.



Рис. 14.30. Изменения стойкости (в процентах) инструментов при резании всухую и с использованием СОЖ (уровень стойкости 100 %):

- 1 — серый чугун; 2 — сфероидальный чугун; 3 — сталь с $\sigma_b < 900$ МПа; 4 — сталь с $\sigma_b > 900$ МПа; 5 — нержавеющие стали; 6 — алюминий

Режущие инструменты при сухой обработке должны обеспечить приемлемые условия резания и иметь высокую стойкость. Поскольку прочность и износостойкость инструментальных материалов снижаются по мере роста температуры, для обработки рекомендуется использовать в первую очередь твердые сплавы и минералокерамику. Если невозможно исключить использование инструментов

из быстрорежущей стали, следует наносить на них покрытия типа TiAlN. Снижение адгезии и сил трения между инструментом и стружкой возможно при нанесении на инструмент алмазных либо алмазоподобных пленок. Эффективность различных покрытий при фрезеровании всухую и с использованием СОЖ показана на рис. 14.31, 14.32.

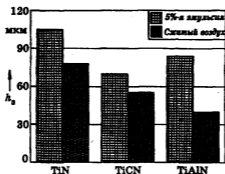


Рис. 14.31. Влияние покрытия на износ фрез при обработке стали 42CrMo4 всухую и с использованием 5%-й эмульсии ($v = 200$ м/мин; $S_z = 0,05$ мм; $t = 12$ мм; путь резания 50 м) [22]

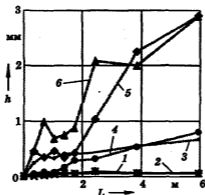


Рис. 14.32. Влияние покрытия на износ концевых фрез при обработке сплава AlZnMgCu1,5 ($v = 1000$ м/мин; $S_z = 0,07$ мм; $t = 6$ мм) [22]:
 1 — покрытие отсутствует; 2 — аморфное покрытие типа C:H;
 3 — покрытие WC; 4 — алмазное покрытие; 5 — с расходом СОЖ 10 мл/ч; 6 — с расходом СОЖ 40 мл/ч

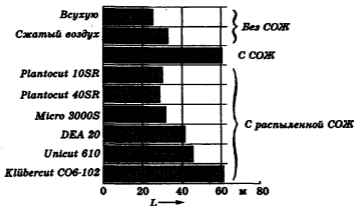


Рис. 14.33. Влияние условий охлаждения на путь резания при сверлении серого чугуна типа СЧ25 сверлами из твердого сплава К20 с покрытием TiN ($v = 120$ м/мин; $S_o = 0,3$ мм/об; диаметр сверла 10 мм)

Сверление всухую или с использованием сжатого воздуха приводит к худшим результатам, чем сверление с СОЖ, однако резание с распыленной СОЖ также может обеспечить хорошие результаты. Здесь, однако, многое зависит от состава технологической среды (рис. 14.33).

Использование электромагнитных эффектов, сопровождающих процесс резания

14.6. резания

14.6.1. Электрические эффекты

Процесс резания материалов на металлорежущих станках сопровождается целым рядом электрических и магнитных явлений. Это обусловлено динамическим характером теплообмена в зоне резания, наличием значительного количества подвижных элементов в работающей технологической системе и их взаимодействием с магнитным полем Земли и производственными магнитными полями. Рассмотрим эти явления более подробно [2, 5].

При обработке резанием станок, зону стружкообразования, инструмент и приспособление в комплексе можно рассматривать как

замкнутую электромагнитную систему. В результате контакта двух разнородных металлов (инструмента и заготовки) при разной температуре спаев имеет место *термоэлектронная эмиссия*, т.е. возникает термоЭДС

$$E = (\alpha_A - \alpha_B)(\Theta_1 - \Theta_2) = \frac{k}{e}(\Theta_1 - \Theta_2) \ln \frac{n_A}{n_B},$$

где α_A, α_B — коэффициенты термоЭДС ветвей термоэлемента по отношению к какому-либо эталонному материалу; Θ_1, Θ_2 — температура соответственно горячего и холодного спаев; k — постоянная Больцмана, равная отношению газовой постоянной к числу Авогадро; e — заряд электрона; n_A, n_B — концентрация свободных электронов в материалах соответственно инструмента и заготовки.

Иными словами, зону стружкообразования можно рассматривать как термоэлемент, создающий термоЭДС. Она зависит от пары инструментальный материал — обрабатываемый материал, а также от режимов резания, определяющих уровень температур в зоне резания, т.е. нагрев горячего спаев термодуэты. Характер зависимостей $E = (v, S, t)$ такой же, как и известных зависимостей $\Theta = (v, S, t)$.

Электрические процессы в зоне резания можно рассматривать в статике и динамике. Если соединить несколько разнородных металлов и вызвать вдоль всей цепи падение температуры, то результирующая термоЭДС между концами m и n определится как алгебраическая сумма всех термоЭДС между каждой парой металлов, а именно:

$$E_{m,n} = E_{m,1} + E_{1,2} + E_{2,3} + \dots + E_{n-1,n}.$$

Об этом обстоятельстве нельзя забывать при рассмотрении термоэлектрических явлений в зоне резания. Контактующие элементы электрической цепи обычно выполняются из разнородных металлов и при резании, т.е. в процессе работы станка, нагреваются до различных температур. Поэтому в местах контакта отдельных звеньев цепи могут возникать термоЭДС разных величины и знака. Как правило, наиболее высокой температурой нагрева характеризуется зона контакта инструмента с деталью. Нагреваются также места контакта инструмента и обрабатываемой детали со станком. Нагреваются подшипники, через которые при работе замыкается контур термоэлектрической цепи. До весьма значительных температур могут нагреваться поверхности контакта режущих элементов с державками (корпусами) при работе составным инструментом. Таким образом, результирующая величина термоЭДС, вызываю-

щей термоток в контуре системы, будет равна алгебраической сумме термоЭДС, возникающих между каждой парой разнородных металлов, входящих в этот контур.

При замыкании в цепи проходит ток

$$I = \frac{E}{R_{\text{вн}} + R_{\text{т.с}}},$$

где $R_{\text{вн}}$ — внутреннее сопротивление элемента инструмент — заготовка (зона стружкообразования); $R_{\text{т.с}}$ — электрическое сопротивление технологической системы.

Электрическое сопротивление технологической системы в наиболее значительной степени определяется сопротивлением станка, которое зависит от его конструкции, технологического состояния, числа опор и передач, характера и условий их смазывания. При остановке станка его сопротивление редко превышает несколько десятых ома, а при работе оно изменяется в широких пределах, достигая иногда нескольких сотен омов.

Большое влияние на электрическое сопротивление технологической системы оказывают режимы резания, поскольку они определяют нагрузку на трущиеся пары и тепловой режим их работы. Сопротивление возрастает при увеличении частоты вращения шпинделя и подачи и падает с повышением нагрузки и температуры смазочной среды.

Электрические процессы наряду с рассмотренной выше статической составляющей характеризуются также и динамической. Возникающие в системе токи имеют импульсный характер вследствие особенностей процесса пластического деформирования и трения. В этом случае некоторые электроны на контактных площадках получают кинетическую энергию, достаточную для преодоления потенциального барьера. Отделение электронов от границы металла приводит к возникновению на контактных площадках электрических потенциалов, изменяющихся с частотой до 5000 Гц. При обработке резанием наблюдается постоянная смена зон микроконтакта: в одних местах происходит разрыв цепи, в других — ее замыкание [5].

При рассмотрении электрической системы различают две цепи термотокков, возникающих в процессе резания: внешнюю по отношению к инструменту, т.е. деталь — станок — инструмент — деталь, и внутреннюю: стружка — деталь — задняя поверхность — инструмент — передняя поверхность — стружка. Во внешней цепи термоток относительно мал. Термоток внутренней цепи обусловлен разницей между термоЭДС на передней и задней поверхностях ин-

струмента. Сопротивление этой цепи очень мало и не превышает нескольких тысячных ома. Поэтому, несмотря на относительно малую термоЭДС (до 25 мВ), сила тока достигает нескольких ампер. Это оказывает значительное влияние на характер протекания контактных процессов и интенсивность изнашивания режущих инструментов.

Кроме явления термоэлектронной эмиссии в процессе резания могут иметь место еще два термоэлектрических явления — эффекты Пельтье и Томсона. Суть *эффекта Пельтье* заключается в том, что при прохождении электрического тока через цепь, составленную из разнородных металлов *A* и *B*, в одном спае происходит выделение теплоты, а в другом — ее поглощение. Таким образом, явление Пельтье оказывается обратным явлению термоэлектронной эмиссии. Количество теплоты, выделяющейся или поглощаемой в единицу времени, определяется выражением

$$Q_{AB} = \Pi_{AB}I,$$

где Π_{AB} — коэффициент Пельтье (ток идет от проводника *A* к проводнику *B*); *I* — сила тока.

При перемене направления тока меняются знак и значение *Q*, т.е. вместо выделения теплоты наблюдается ее поглощение. Следовательно, $\Pi_{AB} = -\Pi_{BA}$.

Выделение теплоты, пропорциональной силе тока, связано с неоднородностью системы, по которой проходит ток, причем эта неоднородность может быть обусловлена не только химическим различием соприкасающихся металлов. В химически однородном проводнике, имеющем неравномерную плотность, теплота Пельтье также выделяется.

Между коэффициентом Пельтье и коэффициентом термоЭДС существует вытекающее из законов термодинамики соотношение

$$\Pi_{AB} = (\alpha_A - \alpha_B)\Theta,$$

где Θ — температура соответствующего спае.

Суть *эффекта Томсона* состоит в том, что при прохождении постоянного электрического тока по однородному проводнику, вдоль которого имеет место градиент температуры, в его объеме независимо от джоулевой теплоты выделяется (или поглощается) теплота Томсона

$$Q_{\tau} = \tau(\Theta_1 - \Theta_2),$$

где τ — коэффициент Томсона.

Эффект Томсона — это как бы внутренний эффект Пельтье, возникающий на границах участков с различными коэффициентами термоЭДС в результате изменения этих коэффициентов с изменением температуры. Объясняется эффект Томсона по аналогии с эффектом Пельтье [2].

На величину результирующего термотока, проходящего по контуру, могут влиять также термо- и гальваномагнитные эффекты, для возникновения которых при резании тоже имеются условия.

14.5.2. Магнитные эффекты

Над поверхностью металла существует колеблющееся магнитное поле. В процессе резания на него накладываются нестационарные поля, возникающие вследствие вихревого характера гальванических токов в электрической системе. Например, гальваническим элементом служит цепь инструмент — деталь. Под действием трения в этой цепи возникает автоматически действующий электрохимический процесс, интенсивность которого определяется термоЭДС.

Свою роль в формировании магнитной системы играет также остаточная намагниченность инструмента и заготовки. Она является связующим звеном между магнитной и электрической системами. При смещении вершины инструмента изменяется направление магнитной индукции и, следовательно, направление ее ЭДС, которая может достигать 10 мВ.

Наряду с воздействием электрической системы на магнитную наблюдается обратное воздействие. При высокочастотных относительных колебаниях инструмента и заготовки могут возбуждаться электрические поля, вызванные ЭДС самоиндукции, наводимой в термоэлектрическом контуре при его размыкании.

Магнитные эффекты тесно связаны с действием теплового поля и разделяются на поперечные и продольные. Под *поперечными* подразумеваются такие эффекты, при которых вторичная разность потенциалов или температур возникает в направлении, перпендикулярном к направлению первичного теплового потока или электрического тока. При этом принято считать, что первичный ток перпендикулярен к направлению силовых линий магнитного поля. Поперечные эффекты являются нечетными функциями магнитного поля, т.е. знак эффекта изменяется при изменении магнитного поля. *Продольными* принято называть те эффекты, при которых возникающая вторичная разность потенциалов или разность температур совпадает по направлению с первичным током. В этом случае также предполагается, что направление первичного тока перпендикулярно к направлению силовых линий магнитного поля. Продоль-

ные эффекты являются четными функциями магнитного поля: знак эффекта не меняется при изменении магнитного поля.

Гальваномагнитные эффекты обусловлены воздействием магнитного поля на электрический ток. Они наблюдаются при прохождении электрического тока по проводнику, помещенному в магнитное поле, и заключаются в возникновении на концах проводника дополнительных электрических потенциалов. Физическая сущность гальваномагнитных эффектов заключается в том, что внешнее магнитное поле не только отклоняет электроны электрического тока с их пути, но и стремится ориентировать спин (осевой момент) электронов, воздействуя тем самым на их энергию. Вызываемое магнитным полем изменение энергетических уровней электронов влияет на изменение сопротивления проводника прохождению электрического тока.

Одним из поперечных эффектов является **гальваномагнитный эффект Холла**. Суть этого эффекта состоит в следующем. Если металлическую пластину (в нашем случае деталь или инструмент), вдоль которой проходит постоянный ток, поместить в перпендикулярное к пластине магнитное поле, то между параллельными току и полю гранями пластины возникает разность потенциалов

$$E = \varphi_1 - \varphi_2.$$

Электродвижущая сила Холла определяется выражением

$$E = RHjb,$$

где R — постоянная Холла, которая зависит от рода металла пластины; H — напряжение перпендикулярного магнитного поля; j — плотность тока, проходящего по пластине; b — ширина пластины.

Выражая плотность тока отношением силы I тока, проходящего по пластине, к площади ab ее поперечного сечения, электродвижущую силу Холла находят по формуле

$$E = R \frac{HI}{a},$$

где a — толщина пластины.

Термомагнитный эффект Нернста — Эттинггаузена — явление, аналогичное явлению Холла, с той лишь разницей, что первичный электрический ток заменяется движением теплового потока. Если на концах пластины поддерживать разность температур $\Theta_1 - \Theta_2$, т.е. создать таким образом течение теплоты, то при помещении пластины в магнитное поле, перпендикулярное к пластине, между параллельными тепловому току и магнитному полю граня-

ми появляется разность потенциалов E , которая определяется следующим образом:

$$E = qbH \frac{\Theta_1 - \Theta_2}{l},$$

где q — коэффициент Нернста — Эттинггаузена; l — длина пластины.

Гальваномагнитный эффект Эттинггаузена заключается в том, что при пропускании постоянного тока вдоль пластины, помещенной в поперечное магнитное поле, между параллельными току и полю гранями появляется разность температур

$$\Delta\Theta = \Theta_1 - \Theta_2 = p \frac{HI}{a},$$

где p — константа, называемая коэффициентом Эттинггаузена.

Термомагнитный эффект Риги — Ледюка заключается в том, что в пластине, на концах которой создана разность температур $\Theta_1 - \Theta_2$ и которая помещена в перпендикулярное к пластине магнитное поле, создается поперечная разность температур $\Delta\Theta$, определяемая по формуле

$$\Delta\Theta = sbH \frac{\Theta_1 - \Theta_2}{l},$$

где s — константа, называемая коэффициентом Риги — Ледюка.

При наличии градиента температур в направлении, перпендикулярном к передней поверхности резца (ось x), за счет напряженности магнитного поля H_z , направленной вдоль продольной оси резца (ось z), возникает градиент температур $\partial\Theta/\partial y$ в направлении, параллельном направлению подачи, за счет чего поток теплоты отклоняется от первоначального направления. В зависимости от того, в какую сторону от вершины резца будет отклоняться тепловой поток, температура на контактных площадках будет повышаться или понижаться.

Как отмечалось, наряду с поперечными в процессе резания имеют место продольные электромагнитные эффекты. **Гальваномагнитный эффект** возникновения продольной разности потенциалов заключается в том, что при прохождении постоянного электрического тока по проводнику, помещенному в поперечное магнитное поле, изменяется сопротивление проводника. Такое изменение сопротивления можно трактовать как продольный эффект Холла, поскольку увеличение сопротивления проводника в поперечном магнитном поле можно рассматривать как появление в нем вторичной продольной разности потенциалов, направленной противоположно первичной разности потенциалов, вызывающей первичный ток.

Гальваномагнитный эффект Нернста является продольным аналогом эффекта Эттинггаузена и заключается в появлении продольной разности температур $\Delta\Theta$ в пластине, по которой проходит ток I , при помещении ее в магнитное поле, перпендикулярное к направлению тока. Падение температуры определяется по формуле

$$\Delta\Theta = L \frac{HI}{ab},$$

где L — коэффициент Нернста.

Термомагнитный эффект Нернста — Эттинггаузена заключается в том, что в проводнике, характеризующемся термической неоднородностью по длине (разностью температур Θ_1 и Θ_2), под влиянием поперечного магнитного поля возникает продольная разность потенциалов

$$E = NaH^2 \frac{\Theta_1 - \Theta_2}{l},$$

где N — константа материала, называемая коэффициентом Нернста — Эттинггаузена.

Термомагнитный эффект Маджи — Ризи — Ледюка состоит в появлении дополнительной продольной разности температур в термически неоднородном по длине проводнике, помещенном в поперечное магнитное поле. Дополнительная разность температур

$$\Delta\Theta = MH^2(\Theta_1 - \Theta_2),$$

где M — коэффициент.

Данный эффект можно рассматривать как изменение теплопроводности материала в магнитном поле.

Степень влияния электромагнитных эффектов как на результирующую термоЭДС, так и на характер распространения тепловых потоков, безусловно, различна. При существующих представлениях об этих эффектах и экспериментальной техники не представляется возможным ни теоретически, ни экспериментально выяснить фактическую долю участия того или иного из рассмотренных эффектов в образовании результирующей термоЭДС и окончательных параметров температурного поля в зоне резания. Используя различные магнитоэлектрические или электронные приборы с большим внутренним сопротивлением, можно лишь довольно точно измерить результирующую термоЭДС, возникающую при резании, или с помощью магнитоэлектрических приборов с малым внутренним сопротивлением измерить долю результирующего термотока, циркулирующего по электрическому контуру, который возникает в зоне резания.

Все перечисленные выше электромагнитные явления в определенных условиях могут оказать влияние на закономерности протекания процессов в зоне резания. Накладывая на зону обработки электрические или магнитные поля, можно существенно повысить период стойкости инструмента, повлиять на условия образования дефектов обработанной поверхности и т.д.

Литература

1. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. М.: Машиностроение, 1975.
2. Бобровский В.А. Электродиффузионный износ инструмента / В.А. Бобровский. М.: Машиностроение, 1970.
3. Обработка металлов резанием с плазменным нагревом / А.Н. Резников [и др.]. М.: Машиностроение, 1986.
4. Подураев В.Н. Обработка резанием с вибрациями / В.Н. Подураев. М.: Машиностроение, 1970.
5. Подураев В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов / В.Н. Подураев. М.: Машиностроение, 1974.
6. Подураев В.Н. Технология физико-химических методов обработки / В.Н. Подураев. М.: Машиностроение, 1985.
7. Полосаткин Г.Д. Резание металлов со сверхвысокими скоростями / Г.Д. Полосаткин, В.Л. Караваева // Обрабатываемость жаропрочных и титановых сплавов. Куйбышев: КуАИ, 1962. С. 95–103.
8. Потапов А.А. Высокоскоростная обработка / А.А. Потапов, Г.И. Айзеншток. М.: ВНИИТЭМР, 1986.
9. Справочник технолога-машиностроителя / Под ред. А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова: В 2 т. М.: Машиностроение, 1986. Т. 2.
10. Cselle T. Today's applications and future developments of coatings for drill and rotating cutting tools / T. Cselle, A. Barimani // Surface & Coating Technology. 1995. V. 76–77. P. 712–718.
11. Flom D.G. High-speed machining / D.G. Flom, R. Komanduri // Metal Handbook. V. 16. Machining ASM International, 1989. S. 597–606.
12. Gente A. Chip Formation in Machining Ti6Al14V at Extremely High Cutting Speeds / A. Gente, H.-W. Hoffmeister // Annals of CIRP. 2001. V. 50. № 1. P. 49–52.
13. Howes T.D. Environmental Aspects of Grinding Fluids / T.D. Howes, H.K. Tönshoff, W. Heuer // Annals CIRP. 1991. V. 40/2. P. 623–630.
14. Ippolito R. High Speed Machining: Tool Performance and Surface Finish in Steel Turning / R. Ippolito, R. Tornincasa, R. Levi // Annals of CIRP. 1988. V. 37. № 1. P. 105–108.
15. Jehle R. Laser — unterstützt drehen für die Serienfertigung / R. Jehle // Werkstatt und Wtrieb. 1999. Bd. 132. № 5. S. 98–100.

16. *Kitagawa T.* Plasma hot machining for new engineering materials / T. Kitagawa, K. Maekawa // *Wear*. 1990. V. 139. № 1. P. 251-267.
17. *Kronenberg M.* Gedanken zur Theorie und Praxis der Ultraschnellzerspannung / M. Kronenberg // *Tech. Zbl. Prakt. Metallbear.* 1961. Bd. 55. № 8. S. 443-446.
18. *Kronenberg M.* Zweiter Bericht über Vervielfachung heute üblicher Schnittgeschwindigkeiten / M. Kronenberg // *Werkstattstechnik*. 1961. Bd. 51. № 3. S. 133-141.
19. *Poulachon G.* Contribution to the Study of the Cutting Mechanisms During High Speed Machining of Hardened Steel / G. Poulachon, A.A. Moisan // *Annals of CIRP*. 1998. V. 47. № 1. P. 73-76.
20. *Scherer J.* Zerspanen von Aluminium bei hohen Schnittgeschwindigkeiten / J. Scherer // *Werkstatt und Betrieb*. 1984. Bd. 117. № 7. S. 355-358.
21. *Shirakashi T.* New trend of machining theory. Way to computational machining / T. Shirakashi // *Int. J. Japan Soc. Prec. Eng.* 1993. V. 27. № 4. P. 299-302.
22. *Schulz H.* Hochgeschwindigkeitsbearbeitung. High-Speed Machining / H. Schulz. München; Wien: Carl Hanser Verlag, 1996.
23. *Schulz H.* Material Aspects of Chip Formation in HSC Machining / H. Schulz, E. Abele, A. Sahm // *Annals of CIRP*. 2001. V. 50. № 1. P. 45-48.
24. *Schulz H.* High Speed Machining / H. Schulz, T. Moriwaki // *Annals of CIRP*. 1992. V. 41. № 2. P. 637-643.
25. *Schulz H.* Aspects in Cutting Mechanism in High Speed Cutting / H. Schulz, G. Spur // *Annals of CIRP*. 1989. V. 38. № 1. P. 51-54.
26. *Tonshoff H.K.* Cutting of hardened steel / H.K. Tonshoff, C. Arendt, R. Ben Amor // *Annals of CIRP*. 2000. V. 49. № 2. P. 547-565.
27. *Toenshoff H.K.* Chip Formation at High Cutting Speeds / H.K. Toenshoff, H. Winkler, M. Patzke // *ASME PED*. 1984. V. 12. P. 95-104.
28. *Tsutsumi C.* High-quality machining of ceramics / C. Tsutsumi, K. Okano, T. Suto // *J. Mater. Process. Technol.* 1993. V. 37. № 1/4. P. 639-654.
29. *Uehara K.* Cutting ceramics with a technique of hot machining / K. Uehara, H. Takeshita // *Annals of CIRP*. 1986. V. 35. № 1. P. 55-58.
30. Ultraprecision metal cutting — the past, the present and the future / N. Ikawa [et al.] // *Annals of CIRP*. 1991. V. 40. № 2. P. 587-594.
31. Ultrasonic superposition vibration cutting of ceramics / J. Kumabe, K. Fuchizawa, T. Soutome, Y. Nishimoto // *Prec. Engineering*. 1989. V. 11. № 2. P. 71-77.
32. *Weber H.* Turning of machinable glass ceramics with an ultrasonically vibrated tool / H. Weber, I. Herberger, R. Pilz // *Annals of CIRP*. 1984. V. 33. № 1. P. 85-87.

Оглавление

Предисловие	3
1. Геометрия режущего лезвия. Элементы режима резания и срезаемого слоя	5
1.1. Главные и вспомогательные движения при различных видах обработки резанием. Поверхности обработки	5
1.2. Координатные плоскости. Поверхности и углы режущего лезвия	8
1.3. Соотношения углов заточки и рабочих углов режущих инструментов ...	20
1.4. Элементы режима резания и срезаемого слоя при основных видах обработки резанием	25
1.5. Классификация видов резания	34
Литература	37
2. Инструментальные материалы	38
2.1. Основные свойства инструментальных материалов	38
2.2. Виды инструментальных материалов и области их применения	40
Литература	53
3. Стружкообразование при резании	55
3.1. Общие сведения о пластической деформации металла в зоне резания...	55
3.2. Виды стружки и условия ее образования	59
3.3. Механизмы образования стружки при свободном прямоугольном резании	62
3.4. Кинематика сливного стружкообразования. Завивание и дробление стружки	75
3.5. Особенности пластического деформирования металла при резании	87
3.6. Деформация стружки	90
Литература	94
4. Трение и контактные явления в зоне резания	96
4.1. Контактные явления в процессе стружкообразования	96
4.2. Трение на контактных площадках	97
4.3. Наростообразование при резании металлов	105
4.4. Взаимосвязь явлений в процессе стружкообразования	112
Литература	116
5. Силы и работа резания. Вибрации в технологических станочных системах	118
5.1. Напряжения в зоне резания при свободном прямоугольном резании	118
5.2. Измерение сил резания	121
5.3. Факторы, влияющие на силу резания при свободном резании	124
5.4. Силы резания при несвободном резании	130
5.5. Работа и мощность резания при различных видах обработки	141
5.6. Вибрации в технологических станочных системах	144
Литература	157
6. Закономерности теплообмена в процессе резания	150
6.1. Баланс теплоты при резании металлов. Законы распределения температур	150

6.2. Методы исследования тепловых потоков и температур в зоне резания ...	164
6.3. Влияние различных факторов на температуру резания	182
6.4. Оптимальная температура резания	185
Литература	188
7. Изнашивание, стойкость и прочность режущих инструментов	190
7.1. Основные физические причины изнашивания режущих инструментов...	190
7.2. Внешняя картина износа лезвий режущих инструментов	197
7.3. Критерия затупления режущих инструментов	202
7.4. Стойкость режущих инструментов	204
7.5. Прочность и разрушение режущих инструментов	212
7.6. Надежность режущих инструментов	216
7.7. Мониторинг состояния режущих инструментов	221
Литература	233
8. Формирование геометрии обработанной поверхности и физико-механических свойств поверхностного слоя детали	235
8.1. Понятие качества поверхностей деталей машин	235
8.2. Механизм возникновения шероховатости поверхности	239
8.3. Формирование физико-механических свойств поверхностного слоя металла при обработке резанием	246
Литература	260
9. Регулирование процесса резания путем воздействия на контактные явления	261
9.1. Резание с применением технологических сред	261
9.1.1. Общие требования к технологическим средам	261
9.1.2. Действие технологической среды в процессе резания	261
9.1.3. Разновидности технологических сред и области их применения	270
9.1.4. Способы ввода технологической среды в зону резания	273
9.2. Резание инструментами с улучшенными эксплуатационными свойствами	279
9.2.1. Способы улучшения режущих свойств инструментов	279
9.2.2. Особенности физических процессов резания инструментами с покрытиями	285
Литература	289
10. Особенности резания при абразивной обработке	290
10.1. Абразивные и алмазные материалы и инструменты	290
10.2. Особенности процесса шлифования	299
10.3. Виды шлифования. Элементы режима резания при шлифовании	303
10.4. Поперечное сечение срезаемого слоя при шлифовании	310
10.5. Закономерности процесса резания единичным зерном	311
10.6. Силы и мощность резания при шлифовании	317
10.7. Тепловые явления при шлифовании и пути управления ими	320
10.8. Действие технологической среды при шлифовании	325

10.9. Изнашивание и стойкость шлифовальных кругов	332
10.10. Эффективность процесса шлифования. Выбор шлифовальных кругов	336
10.11. Выбор режимов шлифования	340
Литература	342
11. Обрабатываемость материалов резанием	343
11.1. Основные характеристики обрабатываемости	343
11.2. Способы оценки обрабатываемости	346
11.3. Способы улучшения обрабатываемости	355
11.4. Обрабатываемость сталей, чугунов, цветных металлов и сплавов	358
11.4.1. Обрабатываемость конструкционных и инструментальных сталей	358
11.4.2. Обрабатываемость чугунов	365
11.4.3. Обрабатываемость алюминиевых сплавов	366
11.4.4. Обрабатываемость медных сплавов	368
11.5. Особенности резания жаропрочных и нержавеющей сталей и сплавов ...	370
11.6. Особенности резания титановых сплавов	377
11.7. Особенности резания порошковых и композиционных материалов и покрытий	380
11.8. Особенности резания пластмасс	388
11.9. Особенности резания керамических материалов	396
Литература	403
12. Процесс резания как система	406
12.1. Система резания, ее элементы и структура	406
12.2. Процесс резания с позиций теории автоматического регулирования ...	412
12.3. Система резания при обработке на станках с ЧПУ и адаптивным управлением	417
Литература	431
13. Оптимизация функционирования системы резания	432
13.1. Оптимальная геометрия режущих инструментов	432
13.2. Критерии оптимальности режимов резания	439
13.3. Расчет режима резания	446
13.4. Оптимизация режима резания с применением ЭВМ	454
Литература	467
14. Пути интенсификации процессов обработки материалов	468
14.1. Современные тенденции в развитии процессов резания	468
14.2. Резание с наложением дополнительных колебаний	473
14.3. Резание с подогревом	475
14.4. Сверхскоростное резание	481
14.5. Резание всухую	495
14.6. Использование электромагнитных эффектов, сопровождающих процесс резания	499
14.6.1. Электрические эффекты	499
14.6.2. Магнитные эффекты	503
Литература	507

Учебное издание

Техническое образование

**Яцерицын Петр Иванович
Фельдштейн Евгений Эммануилович
Корниевич Михаил Анисимович**

Теория резания

Учебник

**Ведущий редактор Л.А. Крупич
Редактор О.В. Литвинова
Художник обложки С.В. Ковалевский
Компьютерная верстка Д.М. Вербалович
Корректор Л.К. Мисуно**

Подписано в печать с готовых диапозитивов 14.07.2006.
Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага газетная. Гарнитура Ньютон.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 29,76. Уч.-изд. л. 27,61.
Тираж 2010 экз. Заказ № 2794.

Общество с ограниченной ответственностью «Новое знание».
ЛИ № 02330/0133439 от 30.04.2004. Минск, пр. Пушкина, д. 15, ком. 16.
Почтовый адрес: 220050, Минск, а/я 79.
Телефон/факс: (10-375-17) 211-50-38. E-mail: nk@wnk.biz

В Москве:
Москва, Колодезный пер., д. 2а.
Телефон (495) 234-58-53. E-mail: ru@wnk.biz

<http://wnk.biz>

Отпечатано в полном соответствии с качеством предоставленных
диапозитивов на ГУП РК «Республиканская
типография им. П. Ф. Анохина», 185005, г. Петрозаводск, ул. Правды, 4