

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Полоцкий государственный университет»

Н.Н. ПОПОК

ТЕОРИЯ РЕЗАНИЯ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ
для студентов машиностроительных специальностей

В двух частях

Часть 2

ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ, ИЗНАШИВАНИЕ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА,
КАЧЕСТВО ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ,
КОМБИНИРОВАННЫЕ ВИДЫ ОБРАБОТКИ,
ОПТИМИЗАЦИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ РЕЗАНИЯ

Новополоцк 2005

УДК 621.91.01 (075.8)

ББК 34.63-1 я 73

П 58

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

А.А. Лысов, кандидат технических наук, доцент кафедры
«Технология машиностроения»;

В.А. Петров, кандидат технических наук, доцент кафедры
«Металлорежущие станки и инструменты»

Одобен и рекомендован к изданию Советом машиностроительного
факультета

П 58 **Попок Н.Н.** Теория резания: Конспект лекций для студ. машиностроительных спец. В 2 ч. Ч. 2. Тепловые явления, изнашивание режущего инструмента, качество обрабатываемой поверхности, комбинированные виды обработки, оптимизация функционирования системы резания. – Новополоцк: ПГУ, 2005. – 116 с.
ISBN 985-418-329-7

Приведены основные понятия и положения теории резания материалов, даны в кратком изложении их пояснения. Рассмотрены физические явления процесса резания, связанные с теплообразованием, изнашиванием лезвия инструмента, формированием обработанной поверхности, а также комбинированные виды обработки и оптимизация функционирования системы резания.

Предназначен для студентов машиностроительных специальностей.

УДК 621.91.01 (075.8)

ББК 34.63-1 я 73

ISBN 985-418-329-7

© Попок Н.Н., 2005

© УО «ПГУ», 2005

СОДЕРЖАНИЕ

Лекция 13	4
Лекция 14	10
Лекция 15	18
Лекция 16	27
Лекция 17	35
Лекция 18	41
Лекция 19	47
Лекция 20	53
Лекция 21	60
Лекция 22	65
Лекция 23	72
Лекция 24	87
Лекция 25	92
Лекция 26	96
Лекция 27	100
Лекция 28	105

ЛЕКЦИЯ 13

Основные виды теплообмена. Теплообмен в твердых телах. Дифференциальное уравнение теплопроводности

Основные виды теплообмена

В связи с постоянным обновлением марок конструкционных материалов, повышением требований к качеству деталей машин и интенсификацией режимов обработки на первый план выходят вопросы, связанные с тепловыми процессами в технологических системах. Чтобы учитывать эти процессы при проектировании технологического оборудования, уметь управлять ими, необходимо знать, прежде всего, как происходит теплообмен в элементах технологической системы.

Различают три вида теплообмена: теплопроводность, конвекцию и тепловое излучение. *Теплопроводность* – это процесс распространения тепловой энергии при непосредственном соприкосновении тел или отдельных частей тела, имеющих разные температуры, например, заготовки, инструмента и деталей технологического оборудования. *Конвекция* – это процесс перемещения объемов жидкости или газа в пространстве из одной области в другую, отличающихся разной температурой. Конвекция тепла всегда сопровождается теплопроводностью, так как при движении жидкости или газа неизбежно соприкосновение их частиц, имеющих различные температуры. Совместный процесс конвекции и теплопроводности называется *конвективным теплообменом*. *Тепловое излучение* – это процесс распространения тепла в виде электромагнитных волн с взаимным превращением тепловой энергии в лучистую и обратно. Пример видов теплообмена при резании представлен на рис. 13.1, где Т – теплопроводность, И – излучение, К – конвекция, КЖ – конвекция с жидкостью, КВ – конвекция с воздухом; ON, OL и OS – участки теплоты от деформации, трения по передней и по задней поверхностям режущего инструмента.

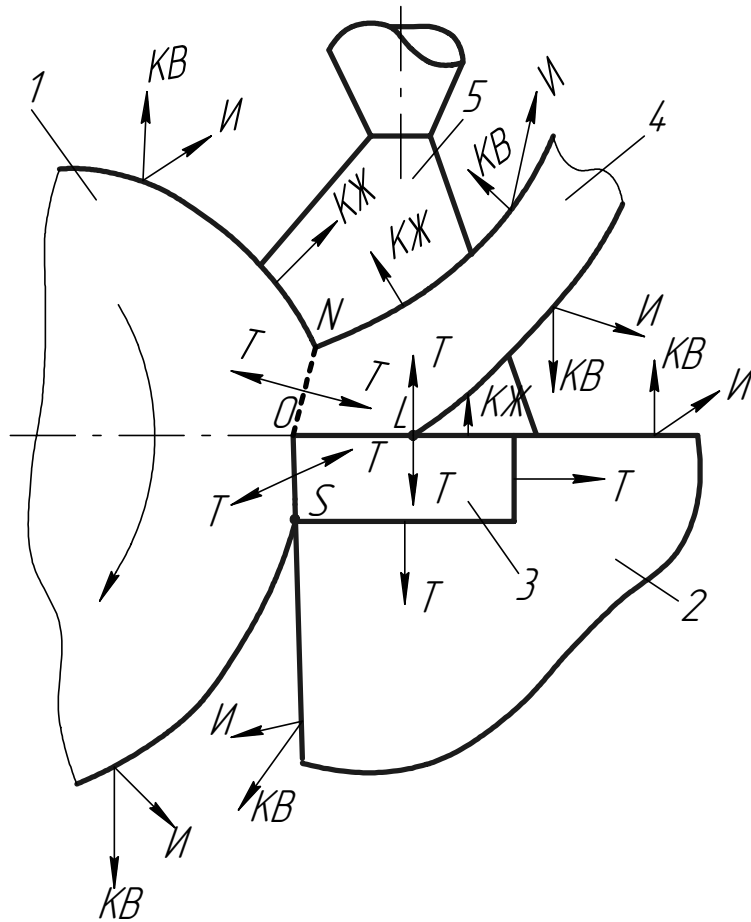


Рис. 13.1. Виды теплообмена в зоне резания:
 1 – заготовка; 2 – режущий инструмент; 3 – режущая пластина;
 4 – стружка; 5 – смазочно-охлаждающая жидкость

Теплообмен в твердых телах

В твердых телах энергию частиц вещества характеризует такой параметр, как *температура*. Если в твердом теле распространяется тепло, то температура в различных точках тела с координатами (x, y, z) и в разное время τ описывается выражением $\theta = f(x, y, z, \tau)$. Совокупность значений температур в различных точках тела в данный момент времени называется *температурным полем*. Если температура зависит от длительности нагрева или охлаждения, то для этого поля характерен *неустановившийся* теплообмен, и температурное поле называется *нестационарным*. И наоборот, если температура не изменяется, то поле называется *стационарным*, а теплообмен – *установившимся*. При анализе тепловых процессов в технологических системах часто приходится встречаться с так называемым *квазистационарным* температурным полем («квази» – как бы). Например, тем-

пературное поле от движущегося источника тепла в неподвижной системе координат будет нестационарным, т. е. $\frac{\partial \theta}{\partial \tau} \neq 0$. Если рассматривать температурное поле в движущейся системе координат, связанной с источником теплоты, то оно будет якобы (квази) стационарным, так как не меняется, перемещаясь вместе с источником теплоты.

Если температура является функцией трех координат, то температурное поле называется *трехмерным*, если двух – *двухмерным* или плоским. Соединив точки в теле с одинаковой температурой, получим *изотермические поверхности* или поверхности равных температур. Сечение изотермической поверхности плоскостями дает семейство изотермических линий – *изотерм* (рис. 13.2). При переходе от одной изотермы к другой температура в теле изменяется, причем наибольший перепад на единицу длины имеет место по направлению нормали к данной изотерме в данной точке. Этот перепад характеризуется величиной $\Delta\theta/\Delta n$, а предел этого отношения $\lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta n} = \frac{\partial\theta}{\partial n}$ называется *градиентом температуры*:

$$\text{grad}\theta = \frac{\partial\theta}{\partial n} \quad (13.1)$$

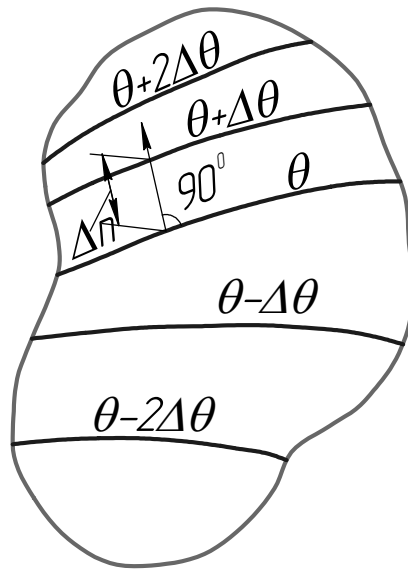


Рис. 13.2. Изотермы и градиент температур

Градиент температуры характеризует интенсивность изменения температуры внутри тела и является векторной величиной, направленной по нормали в сторону возрастания температуры.

Ж.-Б. Фурье высказал гипотезу о том, что количество теплоты dQ , проходящей через изотермическую поверхность площадью dF за время $d\tau$ пропорционально градиенту температур (рис. 13.3): $dQ = -\lambda \text{grad}\theta dF \cdot d\tau$.

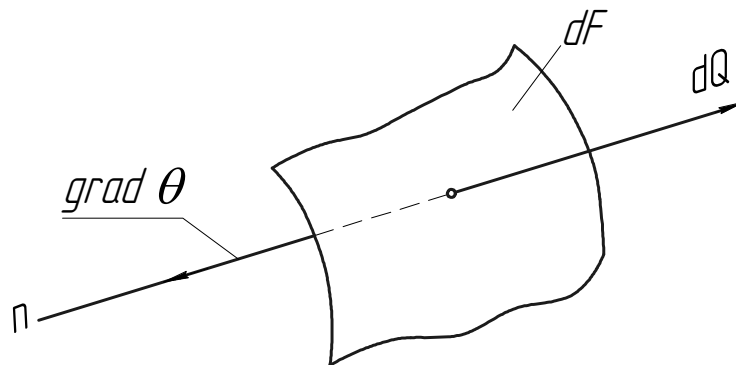


Рис. 13.3. Элемент изотермической поверхности и тепловой поток

Количество теплоты, проходящей через единицу площади изотермической поверхности в единицу времени (плотность теплового потока), определяется соотношением:

$$q = \frac{dQ}{dF \cdot d\tau} = -\lambda \text{grad}\theta, \quad (13.2)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, выражающий количество теплоты проходящей в единицу времени через единицу площади при градиенте температуры в один градус на единицу длины.

Коэффициент теплопроводности характеризует способность данного материала проводить теплоту и зависит от состава вещества, его структуры, плотности, влажности и температуры. Знак минус в формуле (13.2) показывает, что вектор теплового потока направлен в сторону обратную направлению вектора $\text{grad}\theta$. Выражением (13.2) обычно представляют основной закон теплопроводности или *закон Фурье*, утверждающий, что плотность теплового потока прямо пропорциональна градиенту температуры.

Дифференциальное уравнение теплопроводности

При нестационарном режиме перераспределение теплоты сопровождается изменением температуры отдельных элементов тела. Изменение температурного поля твердого тела при нестационарной теплопроводности описывается *дифференциальным уравнением теплопроводности*. Для вывода этого уравнения выделим в теле элементарный объем $\Delta x \Delta y \Delta z$ (рис. 13.4)

и рассмотрим процесс распространения теплоты в нем по направлению одной из осей координат, например OX.

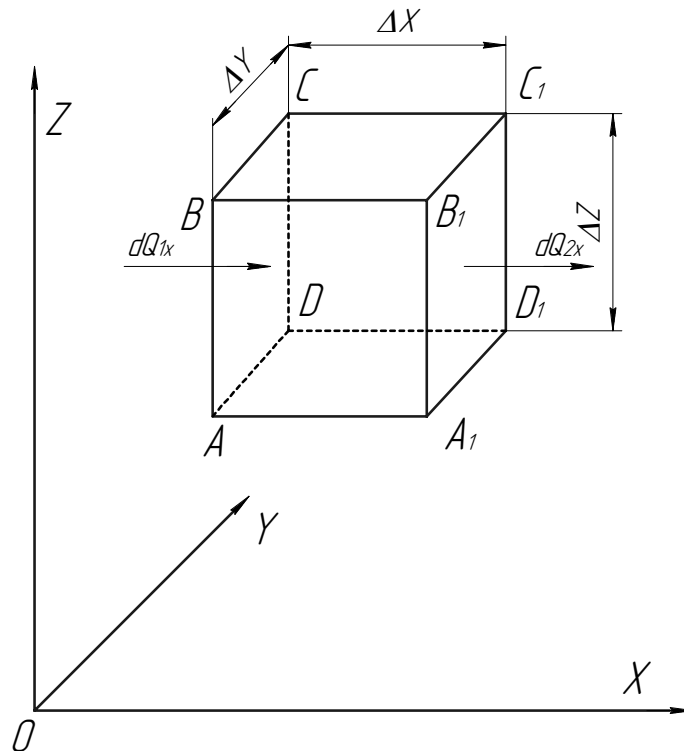


Рис. 13.4. Схема к выводу дифференциального уравнения теплопроводности

За малостью площади $\Delta y \Delta z$ положим, что температура на каждой грани тела распределена равномерно. Пусть на грани $A_1B_1C_1D_1$ температура равна θ , а на грани $ABCD$ – $\theta' = \theta + \Delta\theta_x$, где $\Delta\theta_x$ – изменение температуры вдоль оси OX. Изменение теплового потока от одной грани к другой по направлению OX рассматриваемого тела опишется выражением:

$$dQ_{2x} = \lambda \text{grad}_x \theta \cdot \Delta y \Delta z \cdot d\tau$$

или

$$dQ_{2x} = \lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \cdot \Delta y \Delta z \cdot d\tau .$$

Температура грани ABCD:

$$\theta' = \theta + \Delta x \frac{\partial \theta}{\partial x},$$

тогда

$$\text{grad}_x \theta' = \frac{\partial \theta'}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\theta + \Delta x \frac{\partial \theta}{\partial x} \right),$$

и тепловой поток

$$dQ_{1x} = \lambda \frac{\partial}{\partial x} \left(\theta + \Delta x \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \Delta y \Delta z d\tau,$$

так как $dQ_{1x} > dQ_{2x}$, то в объеме

$$dQ_x = dQ_{1x} - dQ_{2x} = \lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \Delta y \Delta z d\tau + \lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \Delta y \Delta z \Delta x d\tau - \lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \Delta y \Delta z d\tau = \lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \Delta x \Delta y \Delta z d\tau$$

или

$$dQ_x = \lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} dV d\tau. \quad (13.3)$$

Аналогично для координатных осей OY и OZ:

$$dQ_y = \lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} dV d\tau, \quad (13.4)$$

$$dQ_z = \lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} dV d\tau. \quad (13.5)$$

Изменение теплового потока во всем теле опишется выражением:

$$dQ = dQ_x + dQ_y + dQ_z = \lambda \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) dV d\tau. \quad (13.6)$$

Количество теплоты можно определить также через теплоемкость:

$$dQ = \rho \cdot c \cdot dV \left(\frac{\partial \theta}{\partial \tau} \right) d\tau, \quad (13.7)$$

где ρ – плотность материала;

c – массовая теплоемкость;

$\rho \cdot c$ – объемная теплоемкость;

$\frac{\partial \theta}{\partial \tau}$ – скорость изменения температуры тела во времени.

Приравняв выражения (13.6) и (13.7), получим дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \omega \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right), \quad (13.8)$$

где $\omega = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$ – коэффициент температуропроводности, характеризующий теплоинерционные свойства тела.

Это уравнение является общим и справедливо для любой формы тела и любых условий теплообмена.

ЛЕКЦИЯ 14

Схематизация элементов технологической системы. Решения уравнения теплопроводности

Схематизация элементов технологической системы

При решении практических задач, когда имеют дело с конкретными условиями, для описания теплопроводности прибегают к *схематизации элементов технологической системы*. Схематизация предусматривает рассмотрение частных особенностей, дополняющих и конкретизирующих дифференциальное уравнение теплопроводности применительно к тому или иному случаю, и называемых условиями однозначности или краевыми условиями. Эти условия включают:

- 1) начальные условия, т. е. распределение температуры в данном теле до того, как начался изучаемый процесс;
- 2) граничные условия, т. е. описание условий теплообмена поверхностей интересующего нас тела с окружающей средой и другими телами;
- 3) описание формы, размеров и теплофизических характеристик тела, в котором происходит процесс теплопроводности;
- 4) описание формы, размеров и мощности источников или стоков тепла, действующих в рассматриваемом процессе (сток – источник, у которого плотность потока $q < 0$).

Начальные условия отвечают на вопрос о том, какое было температурное поле в рассматриваемом теле в момент времени, принятый за начало отсчета, т. е. $\tau = 0$; $\theta(x, y, z) = \theta_0$.

Различают *граничные условия* первого, второго, третьего и четвертого рода. Условия первого рода предполагают, что известен закон распределения температур на граничных поверхностях тела, т. е. $\theta_S(x, y, z, \tau)$ и $\theta = \theta_S$. Условия второго рода предусматривают, что известен закон распределения плотности тепловых потоков, т. е. $q = \varphi(x, y, z, \tau)$. Условия третьего рода используют в том случае, когда теплообменом поверхности с окружающей средой пренебречь нельзя. Если θ_0 – температура окружающей среды, а α – коэффициент теплообмена между средой и поверхностью, то $q = \alpha(\theta_S - \theta_0)$ или $q = -\lambda \text{grad} \theta_S = -\lambda \frac{\partial \theta_S}{\partial n}$, тогда $\alpha(\theta_S - \theta_0) = -\lambda \frac{\partial \theta_S}{\partial n}$ или

$$\frac{\partial \theta_S}{\partial n} = -\frac{\alpha}{\lambda}(\theta_S - \theta_0).$$

Условия четвертого рода возникают тогда, когда рассматриваемое твердое тело находится в безззорном контакте с другим твердым телом и между ними происходит теплообмен:

$$\theta_{S1}(x_1, y_1, 0, \tau) = \theta_{S2}(x_2, y_2, 0, \tau), \text{ т. е. средние температуры равны } \theta_{S1} = \theta_{S2}.$$

Схематизация формы тел заключается в представлении их в виде (рис. 14.1): неограниченного пространства (а) или полупространства (б); неограниченной пластины (в); неограниченного в одном направлении клина (г); неограниченного (д) или ограниченного с одной стороны (е) стержня; тел, имеющих замкнутый объем и простую форму, например, параллелепипеда (ж), шара (з), цилиндра (и).

Схематизация теплофизических характеристик материалов состоит в том, что при анализе тепловых процессов не учитывается неоднородность этих материалов, а в некоторых случаях и их многокомпонентная структура. Например, абразивный круг включает зерна, связку и воздушные поры, имеющие различные коэффициенты теплопроводности – $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$. В этом случае рассматривают эквивалентный коэффициент теплопроводности: $\lambda = \lambda_1^{p_1} \cdot \lambda_2^{p_2} \dots = \prod_{i=1}^{i=n} \lambda_i p_i$, где λ_i – коэффициент теплопроводности отдельного компонента; p_i – объемная концентрация компонента ($\sum_{i=1}^m p_i = 1$).

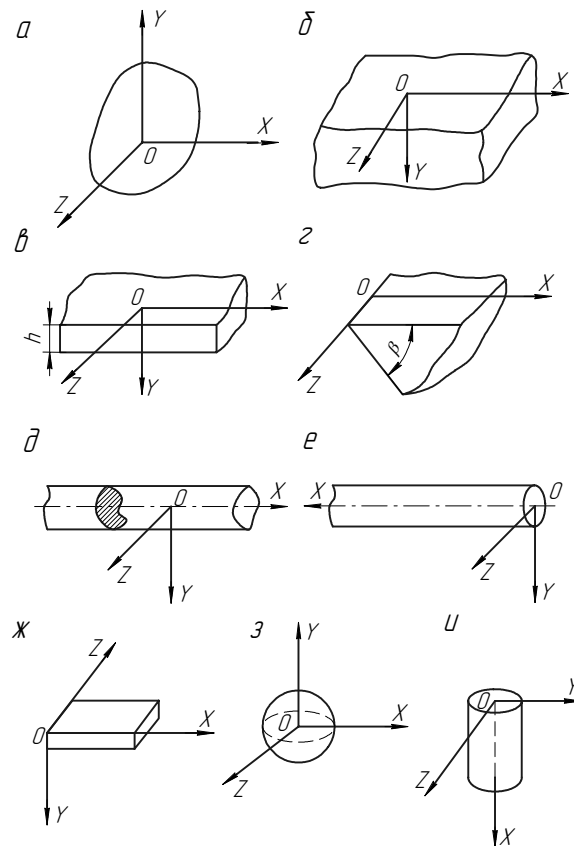


Рис. 14.1. Схематизация формы тел, участвующих в теплообмене

Источники теплоты схематизируются: по форме (рис. 14.2) и могут быть трех-, двух- и одномерные, а также точечные; по скорости перемещения – неподвижные, движущиеся, быстро движущиеся; по времени функционирования – мгновенные, действующие в течение конечного отрезка времени, действующие периодически и стационарные.

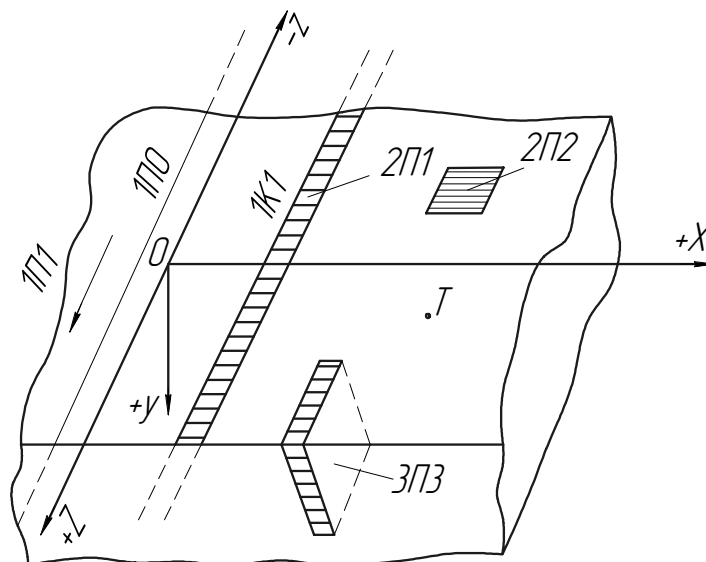


Рис. 14.2. Схематизация источников тепла по форме

Скорость перемещения источника оценивается по критерию Пекле: $Pe = \frac{v \cdot l}{\omega}$, где v – скорость движения источника теплоты; l – путь перемещения источника; ω – коэффициент теплопроводности. Если $Pe > 8 \dots 10$, то источник – быстро движущийся.

Решения уравнения теплопроводности

С учетом вышеприведенных допущений уравнение теплопроводности может быть решено одним из следующих методов: классическим, операционным, численным, источников теплоты и моделированием.

При использовании *классического метода* производится интегрирование дифференциального уравнения (13.8) одним из известных математических способов. В *операционных методах*, например, в методе интегрального преобразования Лапласа изучается не интересующая нас функция, а ее видоизменение, полученное путем умножения на экспоненциальную функцию. При использовании *численных методов* дифференциальное уравнение теплопроводности решается методом конечных разностей. Он основан на замене производных в уравнении (13.8) их приближенными

значениями, выраженными разностями функций $\theta(x, y, z, \tau)$ в отдельных дискретных точках-узлах сетки (предварительно тело разбивается на элементарные объемы правильной формы). Дифференциальное уравнение в этом случае заменяется эквивалентным соотношением конечных разностей, решение которого в виде алгебраических операций реализуется на компьютере. Чтобы определить температуру в любой точке тела в данный момент времени, достаточно знать температуру соседних точек в предыдущий момент времени. Если известно начальное распределение температуры в теле и на его граничных поверхностях, то постепенно, шаг за шагом, перемещаясь от одной точки тела к другой или рассматривая один промежуток времени за другим, можем рассчитать температурное поле в интересующем нас объекте.

Наибольшее распространение в различных областях техники получил *метод источников тепла*. Сущность этого метода определяется двумя основными положениями:

1) температурное поле, возникающее в теплопроводном теле под действием источника тепла любой формы, движущегося или неподвижного, действующего временно или непрерывно, можно получить как результат той или иной комбинации температурных полей, возникающих под действием системы точечных мгновенных источников;

2) процесс распространения теплоты в теле представляется в виде части распространения теплоты в теле неограниченных размеров путем дополнения к фактически действующим источникам некоторой системы фиктивных источников или стоков теплоты.

Если предположить, что в теле, все точки которого имеют одинаковую температуру, а теплообмен с окружающей средой отсутствует, вспыхнул и мгновенно погас точечный источник, выделивший q_T тепла, то решение дифференциального уравнения теплопроводности (13.8) для этих условий запишется в виде:

$$\theta_T(x, y, z, \tau) = \frac{q_T}{\lambda \sqrt{\omega} (4\pi\tau)^{3/2}} \exp \frac{-(x_u - x)^2 + (y_u - y)^2 + (z_u - z)^2}{4\omega\tau}, \quad (14.1)$$

где $\theta_T(x, y, z, \tau)$ – температура любой точки тела;

x, y, z – координаты точки тела;

x_u, y_u, z_u – координаты источника тепла;

τ – время действия источника;

λ и ω – коэффициенты соответственно теплопроводности и температуропроводности материала тела.

Решения дифференциального уравнения для других условий получаются путем интерпретации формы, времени и движения источников теплоты. Например, источник в виде прямой линии может быть представлен как совокупность бесконечно большого числа точечных, поставленных рядом и действующих одновременно. В этом случае температура от линейного источника теплоты будет вычисляться по следующей формуле:

$$\begin{aligned}\theta_l(x, y, \tau) &= \frac{q_l}{\lambda\sqrt{\omega}(4\pi\tau)^{3/2}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[\frac{-(x_u-x)^2+(y_u-y)^2+(z_u-z)^2}{4\omega\tau}\right] = \\ &= \frac{q_l}{\lambda\sqrt{\omega}(4\pi\tau)^{3/2}} \exp\left[\frac{-(x_u-x)^2}{4\omega\tau}\right] \times \exp\left[\frac{-(y_u-y)^2}{4\omega\tau}\right] \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[\frac{-(z_u-z)^2}{4\omega\tau}\right] dz_u = (14.2) \\ &= \frac{q_l}{4\pi\lambda\tau} \exp\left[\frac{-(x_u-x)^2+(y_u-y)^2}{4\omega\tau}\right].\end{aligned}$$

Аналогично можно представить источник любой формы как ту или иную систему точечных источников теплоты. Например, для плоского источника теплоты выражение (14.1) преобразуется к виду:

$$\theta_{II}(y, \tau) = \frac{q_{II}\sqrt{\omega}}{\lambda\sqrt{4\pi\tau}} \exp\left[\frac{-(y_u-y)^2}{4\omega\tau}\right]. \quad (14.3)$$

Если источник действует в течение времени τ , то его можно представить в виде системы мгновенных точечных источников, вспыхивающих и гаснущих с весьма большой частотой, когда период времени между вспышкой и гашением $\Delta\tau \rightarrow 0$. В этом случае импульсы следуют друг за другом с бесконечно малыми промежутками времени и в пределе образуется непрерывно функционирующий источник.

Движение источника можно имитировать рядом последовательных вспышек и гашений мгновенных импульсов в различных точках траекторий перемещения источника. Это легко уяснить, если представить, что ряд последовательно зажигающихся и гаснущих лампочек создают иллюзию движения светового луча.

Вышеприведенные рассуждения и формулы относятся к описанию температурных полей в неограниченных твердых телах. Для перехода от неограниченного тела к ограниченному используют второе положение метода источников тепла. Для того чтобы учесть ограниченность твердых тел надо выполнить отражение источников и стоков теплоты, мысленно прикладывая к основному (реальному) телу ряд подобных ему тел с фиктивными источниками или стоками теплоты. Причем каждое из последующих

тел является зеркальным отражением предыдущего тела относительно плоскости их соприкосновения. В результате отражения можем получить бесконечный ряд двойных источников. И, в конечном итоге, любой из элементарных источников в процессе отражения превращается в одномерный неограниченный, для которого уже есть решение дифференциального уравнения теплопроводности.

Моделирование тепловых процессов осуществляют в основном в двух видах:

1) физическое моделирование, когда изучение процесса теплообмена в реальном теле производится на основе анализа сходного процесса распространения теплоты в модели;

2) математическое моделирование, когда изучение теплообмена в реальном теле производится на основе анализа принципиально другого физического явления, отличающегося от процесса распространения теплоты, но имеющего подобное математическое описание.

В качестве примера, иллюстрирующего первую разновидность, можно привести замену фактического источника теплоты на источник в виде лазера. При этом необходимо обеспечить подобие между моделью и реальным процессом, условия которого состоят в следующем: 1) модель должна быть геометрически подобна реальному объекту; 2) должно быть обеспечено равенство безразмерных координат точек модели и реального объекта; 3) должно иметь место равенство критериев подобия для модели и оригинала.

Второй вид моделирования может быть проиллюстрирован одинаковым математическим описанием разных по физической природе процессов, например, распространения теплоты и электрического тока. Дифференциальное уравнение, описывающее процесс распространения электрического тока в твердом теле, выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial U}{\partial \tau_1} = \frac{\gamma}{c_0} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y_1^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z_1^2} \right), \quad (14.4)$$

где U – потенциал в точке твердого тела с координатами x_1, y_1, z_1 ;

γ – электропроводность;

c_0 – удельная электрическая емкость.

Выражение (14.4) аналогично дифференциальному уравнению (13.8), описывающему процесс распространения теплоты. Уравнением типа (14.4) могут быть описаны процессы движения жидкости в вихревом потоке, распространения звука и т. п.

При анализе тепловых процессов в технологических системах наибольшее распространение получили модели, в которых используется электротепловая аналогия, т. е. аналогия между математическим описанием процессов распространения теплоты и электрического тока. Метод электрической аналогии предусматривает применение моделей двух типов: 1) со сплошной электропроводящей средой; 2) с сеткой, состоящей из активных сопротивлений (резисторов) и емкостей. В качестве сплошной среды чаще всего применяют графитизированную электропроводную бумагу. На бумаге изображается модель тела, к поверхностям которой подводят ток заданной величины, имитирующий тепловой поток. В различных точках модели определяют безразмерный потенциал, по которому затем с использованием метода подобия рассчитывают температуру сходной точки на нагреваемом объекте. Возможно построение на модели эквипотенциалей, которые в известном масштабе представляют собой изотермы на нагреваемом теле. На рис. 14.3 показана схема интегратора для моделирования на электропроводной бумаге тепловых процессов в резце.

Интегратор включает блок питания 1, через контакты *a* и *b* которого подается напряжение на резисторы 11, контакты 12, модель 13 и шину 15. Резисторы 11 служат для подвода к поверхности модели тока заданной плотности, имитирующего тепловой поток, например, со стороны стружки в резец. Блок и установка включаются контактами 2 и 6. Измерительное устройство 9 настраивается с помощью кнопки 4, переключателя декад 3 и реохорды 7. Сопротивление резисторов 11 регулируется настройкой 8 и 10. Иглой 14 устанавливают точку на модели, в которой определяется безразмерный потенциал, переводимый затем в температуру.

При использовании моделей в виде электрических сеток разбивают твердое тело любой формы на элементарные объемы, в каждом из которых термическое сопротивление заменяют резистором соответствующего сопротивления. При необходимости учета теплоемкости тел к сеточной модели из резисторов подключаются электрические конденсаторы. Затем, как и в случае электропроводной бумаги, определяют потенциалы в отдельных узлах сетки. Например, для процесса плоского шлифования устройство моделирования тепловых явлений на электрической сетке представлено на рис. 14.4.

Чтобы смоделировать процесс теплообмена, последовательно подключаются узлы сетки заготовки СЗ (1, 2, 3...*m*) к узлам сетки абразивного круга СК (*a*, *b*, *c*...*R*) в порядке, соответствующем ходу процесса шлифования (на рис. 14.4 показано в увеличенном виде). Каждая пара узлов подключается

к соответствующему истоку А, В...К, включающим резисторы $R_A \dots R_K$. Блок питания БП обеспечивает создание на узлах моделей СК и СЗ потенциалов, измеряя которые можно с использованием правила подобия определить температуру на поверхностях заготовки и абразивного круга.

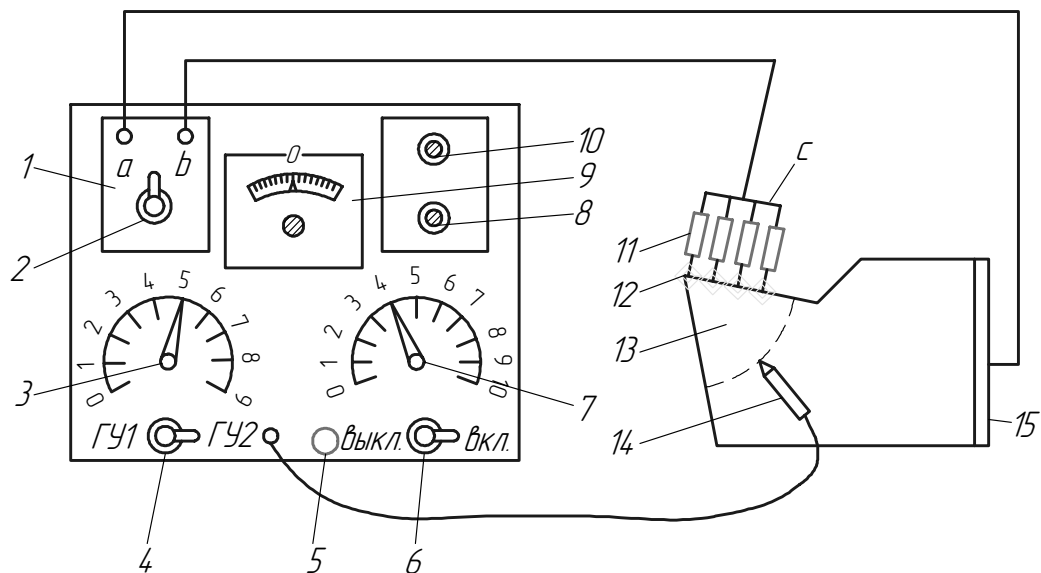


Рис. 14.3. Устройство для моделирования тепловых явлений на электропроводной бумаге

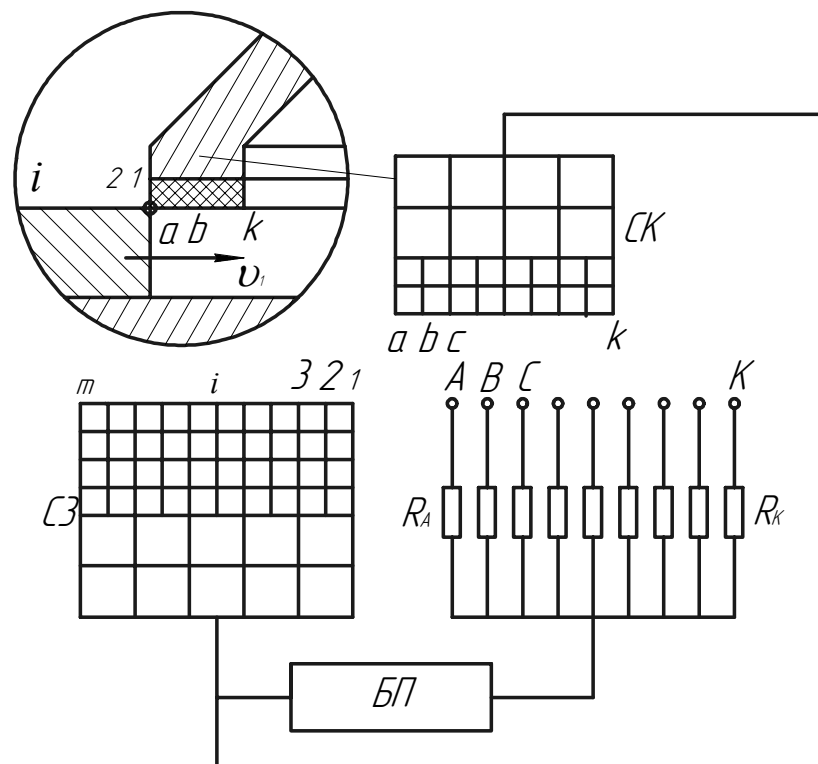


Рис. 14.4. Устройство для моделирования тепловых явлений на электрической сетке

ЛЕКЦИЯ 15

Теплота и тепловой баланс при резании. Тепловые потоки в зоне резания. Влияние режима резания и геометрии инструмента на температуру резания. Управление тепловыми процессами при резании

Теплота и тепловой баланс при резании

Экспериментами установлено, что при резании конструкционных материалов более 99,5 % работы резания переходят в тепло. Количество тепла, выделяющегося в процессе резания, определяется по формуле:

$$Q = P_z \cdot v, \quad (15.1)$$

где P_z – тангенциальная составляющая силы резания;

v – скорость резания.

Эта теплота образуется в следующих очагах (рис. 15.1): 1) в плоскости деформации Q_d ; 2) в приконтактных областях инструмента со стружкой $Q_{ТП}$; 3) в приконтактных областях инструмента с заготовкой $Q_{ТЗ}$. Теплота расходуется на нагрев стружки Q_c , нагрев заготовки Q_3 , нагрев инструмента $Q_{и}$, нагрев окружающей среды Q_0 . Уравнение, связывающее образующуюся теплоту с расходной, называется *уравнением теплового баланса*:

$$Q = Q_d + Q_{ТП} + Q_{ТЗ} = Q_c + Q_3 + Q_{и} + Q_0. \quad (15.2)$$

При обработке конструкционных материалов величины составляющих теплоты, входящих в уравнение (15.2), по отношению к общему количеству теплоты колеблются в следующих пределах: $Q_d = (60...90 \%)Q$; $Q_{ТП} = (20...30 \%)Q$; $Q_{ТЗ} = (5...10 \%)Q$; $Q_c = (60...90 \%)Q$; $Q_3 = (30...60 \%)Q$; $Q_{и} = (5...15 \%)Q$; $Q_0 = (2...3 \%)Q$.

Как видно из этих соотношений, количество тепла, выделяемого в зоне деформации, наибольшее, так как в этой зоне совершается основная работа резания. Образующее тепло в большей части расходуется на нагрев стружки, что связано, прежде всего, с более высокой теплопроводностью материала заготовки по сравнению с инструментальным материалом и малыми объемами стружки. Однако температура на передней поверхности лезвия инструмента высока и примерно равна температуре стружки.

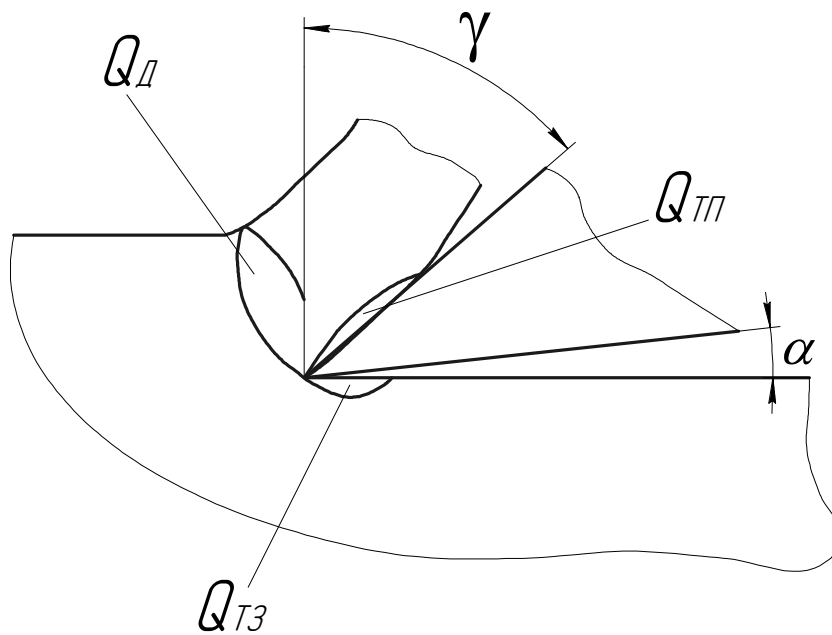


Рис. 15.1. Схема очагов образования теплоты при резании

Тепловые потоки в зоне резания

В зоне резания тепловые потоки от источников теплообразования устремляются в стружку, инструмент и заготовку (рис. 15.2, а). При этом стружка и поверхностные слои заготовки оказываются под одновременным воздействием двух источников тепла: стружка – от источников деформации и трения о переднюю поверхность; заготовка – от источников деформации и трения о заднюю поверхность. В этих условиях стружка оказывается более нагретой, чем инструмент и заготовка.

Как видно из схемы распространения тепловых потоков (см. рис. 15.2, а), существует два вида тепловых потоков: 1) тепловые потоки от непосредственного нагрева за счет источников тепла, называемые *теплообразующими потоками* – $q_d^c, q_d^z, q_{тп}^c, q_{тп}^и, q_{тз}^z, q_{тз}^и$; 2) тепловые потоки, вызванные дополнительным распределением тепла в результате неравномерного нагрева, называемые *теплообменными потоками* – $q_{д}^{и'}, q_{д}^{и''}$.

Теплообразующий $q_{тп}^и$ и теплообменный $q_{д}^{и'}$ потоки на передней поверхности, а также аналогичные потоки на задней поверхности инструмента, действующие на одних и тех же площадках, можно обозначить:

$$q_n = q_{тп}^и + q_{д}^{и'}, \quad q_z = q_{тз}^и + q_{д}^{и''}$$

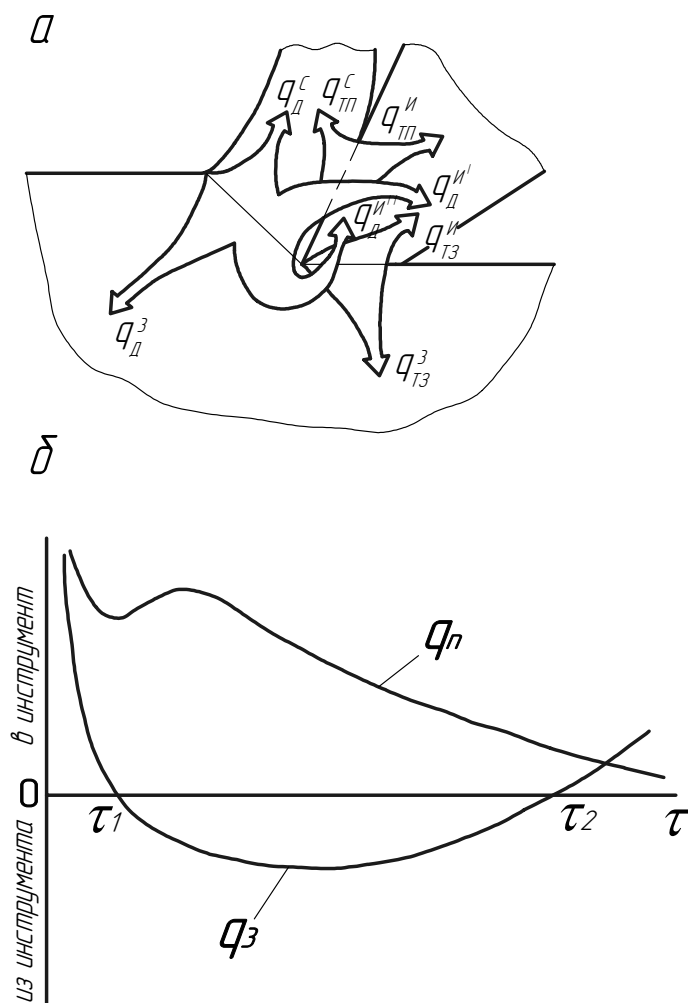


Рис. 15.2. Схема тепловых потоков в зоне резания (а) и их изменение (б) в течение времени обработки

На рис. 15.2, б показана типичная картина изменения во времени плотности тепловых потоков $q_{\text{П}}$ и $q_{\text{З}}$ при обработке заготовок из конструкционных материалов инструментами из быстрорежущей стали и твердого сплава. В начальный короткий промежуток времени резания (меньше τ_1) тепловые потоки $q_{\text{П}}$ и $q_{\text{З}}$ направлены в инструмент. Это объясняется тем, что холодное лезвие соприкасается со стружкой и заготовкой, температура которых мгновенно повышается с началом резания. В связи с энергичным отводом тепла в тело инструмента температура на его контактных площадках более низкая, чем при установившемся резании.

Однако с течением времени тепло, поступающее в инструмент, быстро нагревает режущее лезвие, и плотности потоков $q_{\text{П}}$ и $q_{\text{З}}$ снижаются. К моменту времени τ_1 (0,1...0,2 с) инструмент нагревается настолько, что тепловой поток $q_{\text{З}}$ меняет свое направление ($q_{\text{З}} < 0$) в сторону заготовки. С это-

го момента времени заготовка является своеобразным охладителем инструмента, о чем свидетельствует некоторое возрастание итогового потока в сторону заготовки. Далее наступает период установившегося теплообмена ($\tau_1 \leq \tau \leq \tau_2$), в течение которого плотности потоков q_{Π} и q_3 мало изменяются.

По мере изнашивания инструмента температура на его задней поверхности возрастает. Поэтому при сохранении направления потока $q_3 < 0$ абсолютное значение его плотности постепенно уменьшается.

Дальнейшее увеличение износа и температуры на задней поверхности инструмента, сопровождающееся снижением плотности потока q_3 , приводит к тому, что в режущем лезвии накапливается все большее количество теплоты. Плотность потока q_{Π} медленно снижается, в связи с чем температура резания возрастает. В момент времени τ_2 поток q_3 становится равным нулю, а затем изменяет направление ($q_3 > 0$) – теплота идет в инструмент и это поступление тем больше, чем больше износ инструмента. Ко времени $\tau > \tau_2$ режущее лезвие насыщено теплотой и ее дальнейшее поступление создает условия, в которых инструмент теряет свои режущие свойства, т. е. наступает его катастрофический износ.

Анализ изменения плотности тепловых потоков q_{Π} и q_3 во времени позволяет сделать следующие выводы:

1. Желательно как можно дольше поддерживать период $0 \leq \tau \leq \tau_1$, соответствующий минимальным значениям температуры на поверхностях лезвия инструмента.
2. При износе лезвия инструмента по передней поверхности желательно интенсифицировать тепловой поток q_{Π} , а при износе лезвия по задней поверхности – снижать плотность теплового потока q_3 .
3. Поскольку заготовка является охладителем инструмента, целесообразно отводить максимальное количество теплоты через заднюю поверхность лезвия.

Влияние режима резания и геометрии инструмента на температуру резания

Классическое представление о влиянии режима резания, геометрии инструмента и других факторов обработки на температуру резания можно проиллюстрировать на примере эмпирической зависимости:

$$\theta = C_{\theta} \cdot t^{x_{\theta}} \cdot S^{y_{\theta}} \cdot v^{z_{\theta}} \cdot k_{\theta}. \quad (15.3)$$

Анализ этой зависимости показывает, что с увеличением v возрастает количество тепла в зоне резания, а также температура нагрева заготовки, стружки и инструмента. Однако рост температуры в зоне резания отстает от роста скорости резания (рис. 15.3, а). Это отставание особенно усиливается в зоне высоких скоростей и характеризуется показателем степени $z_\theta < 1$.

С ростом глубины резания t или ширины среза b прямо пропорционально растет сила, работа резания и количество выделяющейся теплоты. Во столько же раз увеличивается и длина активной части режущего лезвия, а соответственно и отвод тепла. Поэтому с увеличением b температура резания $\theta_{рез}$ изменяется незначительно и характеризуется показателем $x_\theta \approx 0,1$.

С увеличением подачи S или толщины среза a сила резания P_z растет примерно в степени 0,75, возрастают также работа резания и количество выделяемого тепла. Одновременно растет площадь контакта стружки с передней поверхностью резца. Это улучшает условия отвода тепла, поэтому рост $\theta_{рез}$ отстает от роста a и показатель степени $y_\theta \approx 0,2...0,3$.

С ростом прочности, твердости и пластичности обрабатываемого материала (коэффициент C_θ) возрастает температура резания. Чем выше теплопроводность обрабатываемого материала, тем ниже θ , т. е. отвод тепла более интенсивен.

Влияние геометрии режущего лезвия на температуру резания определяется коэффициентом K_θ . Например, с увеличением переднего угла лезвия γ снижается сила резания P_z , работа резания и количество тепла (рис. 15.3, б). Однако при этом ухудшаются условия отвода тепла, т. к. уменьшается величина угла заострения β . С увеличением γ выше γ_{opt} снижается массивность лезвия резца, ухудшаются условия отвода тепла, что приводит к повышению θ .

С уменьшением угла в плане ϕ увеличивается угол при вершине ϵ , что приводит к возрастанию массы режущего лезвия и улучшению теплоотвода, а следовательно, к снижению θ и наоборот (рис. 15.3, в).

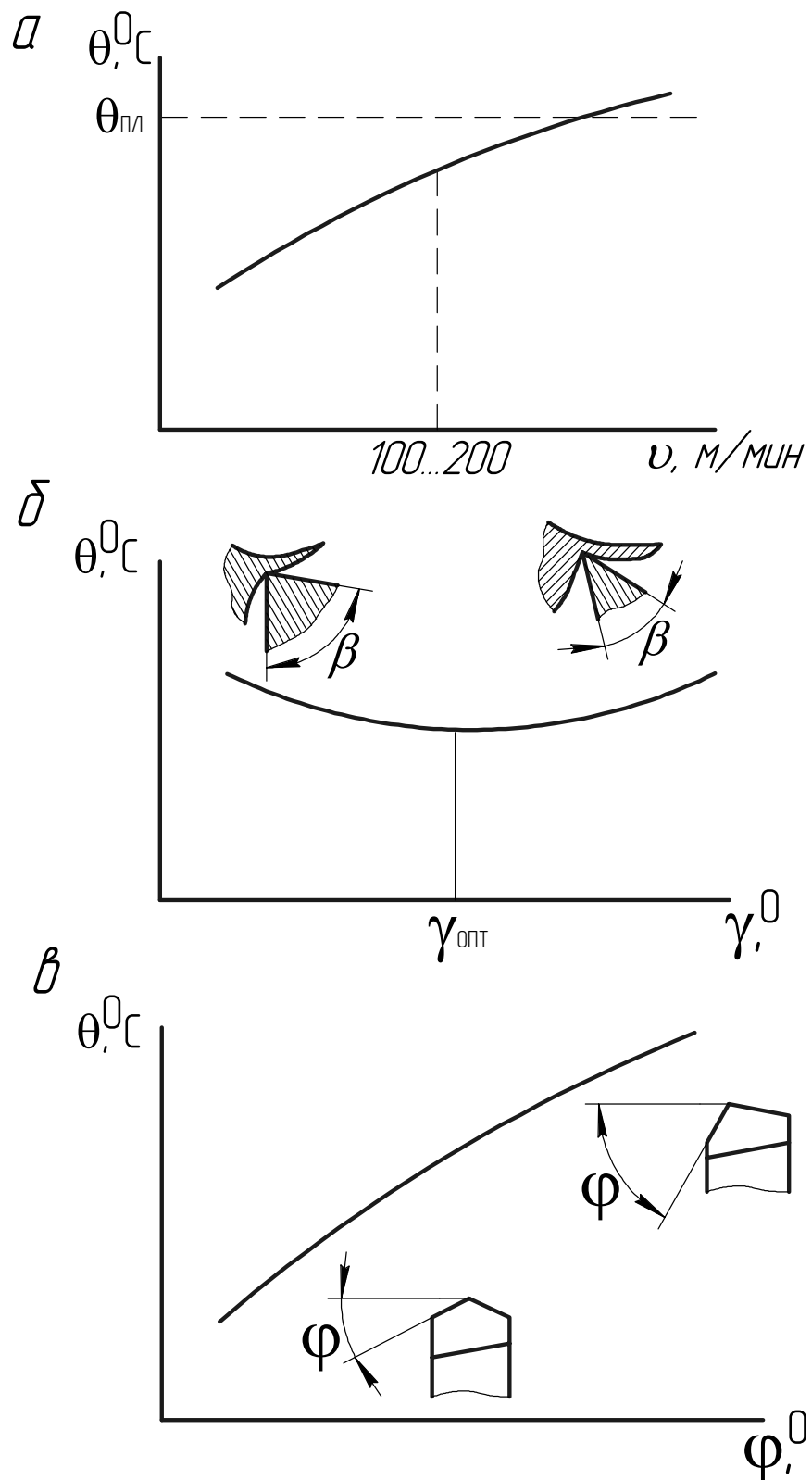


Рис. 15.3. Зависимости температуры резания от скорости резания (а), переднего угла (б) и угла в плане (в)

Управление тепловыми явлениями при резании

Целью управления тепловыми явлениями при резании является общее изменение температуры в зоне обработки и направленное изменение температуры отдельных участков инструмента и заготовки. Достижение этой цели позволяет создать оптимальные условия контакта инструмента с заготовкой, снизить температурные деформации элементов технологической системы, повысить стойкость инструмента и т. д. Для общего изменения температуры резания применяются способы регулирования мощности теплообразования и длительности контакта инструмента с обрабатываемым материалом; ротационной обработки; комбинирования различных видов энергии; подачи СОЖ. Для направленного изменения температуры применяются способы регулирования размеров контактных площадок; дополнительные теплоотводящие кромки и фаски; различное размещение и размеры режущих пластин, а также использование материалов режущих пластин с различным коэффициентом теплопроводности. Рассмотрим примеры реализации этих способов.

Регулирование мощности тепловыделения может быть достигнуто изменением режима резания, геометрии и конструкции инструмента.

Уравнение (15.1) с учетом эмпирической зависимости силы резания от элементов режима резания может быть представлено в виде формулы:

$$Q = C_{pz} b^{x_{pz}} \cdot a^{y_{pz}} \cdot v^{z_{pz}}, \quad (15.4)$$

где b и a – соответственно ширина и толщина среза;

C_{pz} – коэффициент, зависящий от свойств материала заготовки;

$x_{pz} = 1$, $y_{pz} = 0,7 \dots 0,8$, $z_{pz} = - (0,1 \dots 0,2)$ – показатели степени при соответствующих аргументах (численные значения приведены для случая обработки конструкционных материалов).

Несмотря на большое значение показателя степени x_{pz} влияние b на количество теплоты резания невелико, т. к. с увеличением b возрастает длина контакта инструмента с заготовкой и стружкой и улучшается теплоотвод, что практически не изменяет удельную мощность тепловыделения. Поэтому наибольшее влияние на удельную мощность тепловыделения оказывают v и a . Управление скоростью резания и подачей для поддержания необходимого уровня мощности тепловыделения широко применяется при обработке торцовых и конических поверхностей заготовок на лоботокарных и карусельных станках, сложных контуров на станках с ЧПУ.

Увеличивая скорость резания на 2...3 порядка ($v = 200 \dots 1000$ м/с) по сравнению с обычно применяемыми значениями v , можно не только поддерживать постоянное тепловыделение, но и снижать температуру резания при одновременном повышении производительности процесса резания. Достигается это за счет того, что при *сверхскоростном резании* отделение срезаемого слоя происходит в результате не пластического, а хрупкого разрушения, требующего меньшей работы деформирования металла в зоне резания.

Эффективным способом регулирования мощности тепловыделения является *распределение работы резания между несколькими инструментами или зубьями, работающими последовательно или одновременно*. Наглядным примером является замена расточного резца зенкером с числом зубьев z . При одинаковой подаче на один оборот заготовки или инструмента толщина среза, приходящегося на одно лезвие зенкера, в z раз меньше, чем при работе резцом. Поэтому и тепловыделение в зоне резания каждого зуба зенкера меньше, чем в зоне резания расточного инструмента. Вместе с тем мощность тепловыделения при работе многолезвийным инструментом, по сравнению с мощностью тепловыделения при работе однолезвийным, снижается в z^{1-m} раз, т. к. вследствие особенностей процесса пластического деформирования удельные энергозатраты на удаление 1 мм^3 материала заготовки, а значит и тепловыделение, повышаются с уменьшением толщины среза одним лезвием.

Регулирование длительности контакта инструмента с заготовкой как фактор изменения температуры резания основано на выводе (см. рис. 15.2, б) о более низких температурах на поверхностях инструмента при неустановившемся теплообмене, чем при стационарном. Неустановившийся теплообмен характерен, например, для процесса строгания, где средний уровень температур можно регулировать соотношением между скоростями рабочего и вспомогательного ходов. При торцовом фрезеровании оптимальное соотношение между временем резания и холостого пробега фрезы можно получить, рассчитав диаметр инструмента при заданной ширине фрезерования.

Преимущества теплового режима прерывистого резания можно использовать и при обтачивании, например, фрезоточении и ротационном точении заготовок (рис. 15.4).

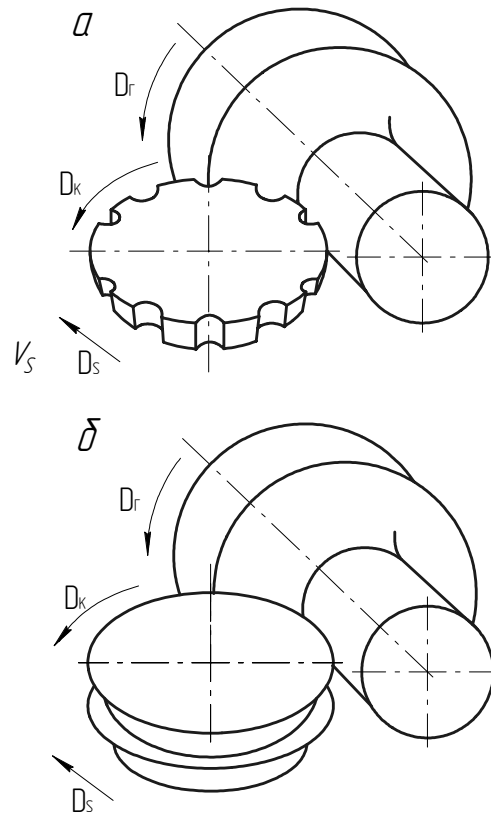


Рис. 15.4. Схемы фрезоточарной (а) и ротационной (б) обработки

При фрезоточении (рис. 15.4, а) используется специальный инструмент с расположенными по окружности лезвиями, которому помимо движения подачи D_s сообщается дополнительное вращательное движение D_k . При этом достигается снижение температуры в зоне резания и повышение стойкости инструмента. Кроме того, обеспечивается устойчивое стружко-долбление и повышение производительности обработки, так как глубина резания в этом случае не связана с шириной среза.

При ротационном точении круглым одним или двумя коаксиально установленными резцами (рис. 15.4, б) снижение температуры резания связано не только с нестационарностью теплообмена, но и с частичной заменой трения скольжения на трение качения, что снижает мощность тепловыделения. Этот фактор наряду с удлинением активного участка режущей кромки приводит к значительному повышению стойкости вращающегося резца по сравнению с традиционным токарным резцом.

Управлять тепловыми явлениями при резании можно также путем рационального использования смазочно-охлаждающих сред, комбинированием различных видов энергии, выбором рациональной конструкции режущей части инструмента и другими методами, которые будут рассмотрены в соответствующих разделах курса.

ЛЕКЦИЯ 16

Методы экспериментального определения теплоты и температуры в элементах технологической системы

Экспериментальное определение теплоты и температуры в технологической системе необходимо при решении тепловых задач опытным путём и для проверки теоретических расчётов температуры.

Методы определения температуры делятся на косвенные и прямые. К *косвенным* относятся методы оценки значений температуры по некоторым её косвенным проявлениям. Например, по изменению составляющей силы резания P_z , т. к. количество тепла определяется по формуле $Q = P_z \cdot v$. *Прямые методы* основываются на сравнительно более точном определении температуры с использованием температурных датчиков. Прямые методы, в свою очередь, подразделяются на *контактные* и *бесконтактные*. К *контактным* относят методы и устройства, в которых между датчиком температуры и объектом измерения имеется непосредственный контакт. К *бесконтактным* – методы, при которых датчики измерительных устройств находятся на некотором удалении от объекта, температура которого подлежит определению.

Контактные методы

При контактных методах используются термометры, термоиндикаторы, термопары; при бесконтактных – радиационные и другие устройства, оптические, акустические и пневматические датчики.

В силу специфики измерения температуры элементов технологической системы термометры (ртутные, монометрические и механические) применяются в основном для определения температуры жидкостей, расплавов и при тарировании. Также ограниченное применение находят термоиндикаторы, которые подразделяют на химические, термохимические и плавления. Термоиндикаторы выпускаются в виде термокарандашей, термотаблеток, термокрасок, термолаков и термобумаги. Термоиндикаторы имеют диапазон измерения температуры от 20 °С до 1500 °С и несколько изменений цвета (от 1 до 6). Каждый из цветов показывает определённую температуру. Например, фторид кобальта CoF_2 по цвету оранжевый, а при температуре 85 °С становится светло-розовым.

Термоиндикаторы в виде плавких вставок представляют собой вещества, которые в определённом интервале температур переходят в жидкое кристаллическое состояние. В качестве таких веществ чаще всего используют олово ($\theta_{\text{пл}} = 231,9 \text{ }^\circ\text{C}$), кадмий ($\theta_{\text{пл}} = 320,9 \text{ }^\circ\text{C}$), цинк ($\theta_{\text{пл}} = 419,5 \text{ }^\circ\text{C}$), серебро ($\theta_{\text{пл}} = 960 \text{ }^\circ\text{C}$), медь ($\theta_{\text{пл}} = 1083 \text{ }^\circ\text{C}$).

Из прямых методов наиболее широкое применение получили методы с использованием термопар, калориметров и радиационных пирометров.

Термопарой называется спай двух разнородных металлов, общая точка которых С называется горячим спаем, а все остальные соединения разнородных металлов А и В в цепи термопары называются холодными спаями (рис. 16.1).

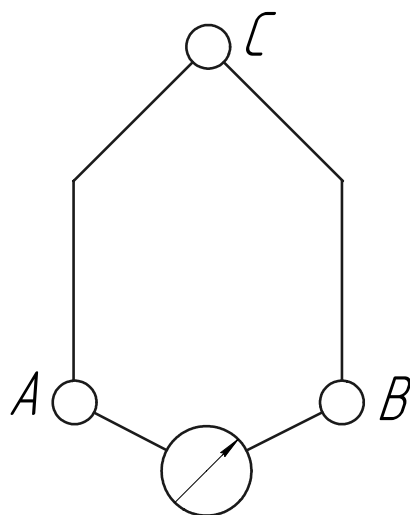


Рис. 16.1. Принципиальная схема термопары

В термопарах используют явление, которое состоит в том, что в замкнутой цепи из двух разнородных металлических проводников при нагреве одного из спаев возникает электрический ток или так называемая термоэлектродвижущая сила (термо-ЭДС). Термопара фиксирует разность температур между горячим и холодным спаями. Холодные спаи могут поддерживаться при комнатной температуре или нулевой температуре, которая обеспечивается за счёт размещения холодных спаев в сосуде с таящим льдом.

К термопаре, используемой для измерения температуры резания, предъявляются следующие требования: 1) термо-ЭДС сплава должна быть достаточно большой; 2) температура плавления термоэлектродов должна

быть выше, чем измеряемая температура тела; 3) материалы сплава должны быть коррозионно-стойкие, прочные и пластичные; 4) характеристики термоэлектродов должны быть неизменны в процессе эксплуатации. Термопары при измерении температуры резания делятся на искусственные, полуискусственные или полустественные, естественные (рис. 16.2). Искусственная термопара состоит из двух проводников, не являющихся инструментом и заготовкой (рис. 16.2, а). Достоинство искусственной термопары – это возможность использования стандартных термопар с известными термоэлектрическими характеристиками. Недостаток – измеряемая термопарой температура ниже температуры на контактных поверхностях инструмента и зависит от расстояния термопары до указанных поверхностей. Искусственные термопары могут быть прижимные, закладные, бегущие, напылённые, перерезаемые. Например, бегущие термопары применяются для изучения закона распределения температуры на контактных поверхностях инструмента (рис. 16.3). Обработываемая поверхность заготовки выполняется в виде винтового гребня с отверстием под электроды из проволоки диаметром 0,1 мм и материала – медь, константант. До начала резания проводники не замкнуты и их контакты К1-К2 и К3-К4 подсоединены к измерительным приборам. При перерезании электроды замыкаются, и приборы фиксируют изменение температуры резания на передней и задней поверхностях режущего инструмента. В *полуискусственной термопаре* только один из проводников не принадлежит компонентам технологической системы, а второй присутствует в ней естественно, выполняя какую-либо функцию в процессе обработки (рис. 16.2, б). Полуискусственная термопара имеет следующие преимущества: 1) проще искусственной; 2) позволяет уменьшить объём термочувствительной зоны термопары до площади поперечного сечения электрода; 3) сравнительно просто закладывать термоэлектрод в объект; 4) применение одного стандартного термоэлектрода (медь, хромель, константант, алюмель). Недостатки этой термопары: 1) необходимость изготовления специальных гнезд и отверстий для закрепления электродов; 2) необходимость тарировки стандартного термоэлектрода с материалом резца или заготовки.

В *естественной термопаре* оба проводника, образующие спай, естественно присутствуют в технологической системе, участвуя в ней в качестве необходимых компонентов (рис. 16.2, в).

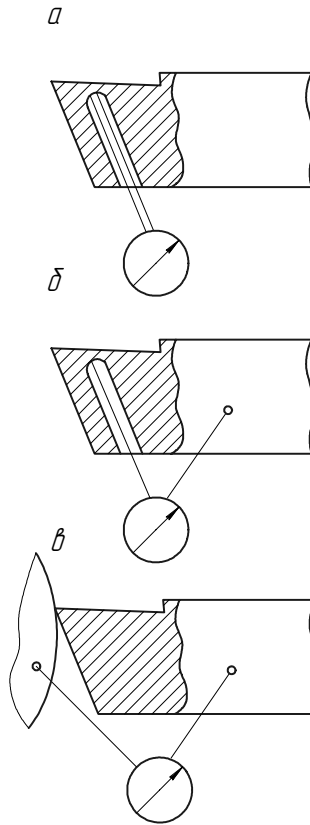


Рис. 16.2. Схемы искусственной (а), полуискусственной (б) и естественной (в) термопар

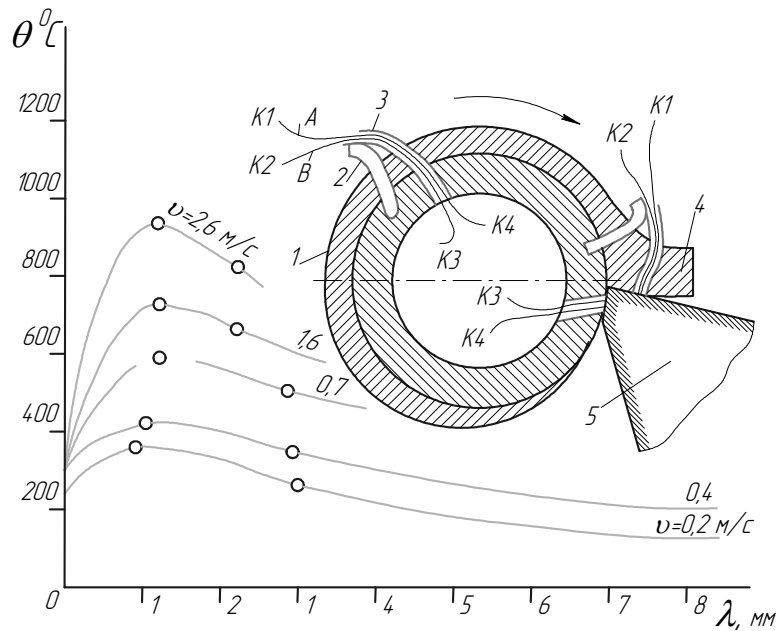


Рис. 16.3. Перерезаемая (бегущая) искусственная термопара и зависимость распределения температуры θ на прирезцовой поверхности стружки λ при точении заготовки из стали 45 (резец ВК8, сечение среза $6 \times 0,5 \text{ мм}^2$)

Преимущества естественной термопары: 1) простота использования; 2) даёт информацию о температуре нагрева непосредственно контактных площадок инструмента, т. е. о той температуре, которая наиболее опасна для инструмента. Недостатки: 1) необходимость тарирования любой вновь образуемой термопары, например, при замене изношенного резца; 2) термопара даёт среднюю температуру на контактных площадках инструмента; 3) невозможность в процессе тарирования воссоздать реальные условия контакта термоэлектродов.

Примером естественно образуемой термопары может служить контакт резца и заготовки при обработке на токарном станке (рис. 16.4). Схема измерения включает миллиамперметр 1, ртутную ванночку 2, гибкий контакт 3, изолирующую заглушку 4, токопровод 5, заготовку 6, инструмент 7 и изолирующие прокладки 8.

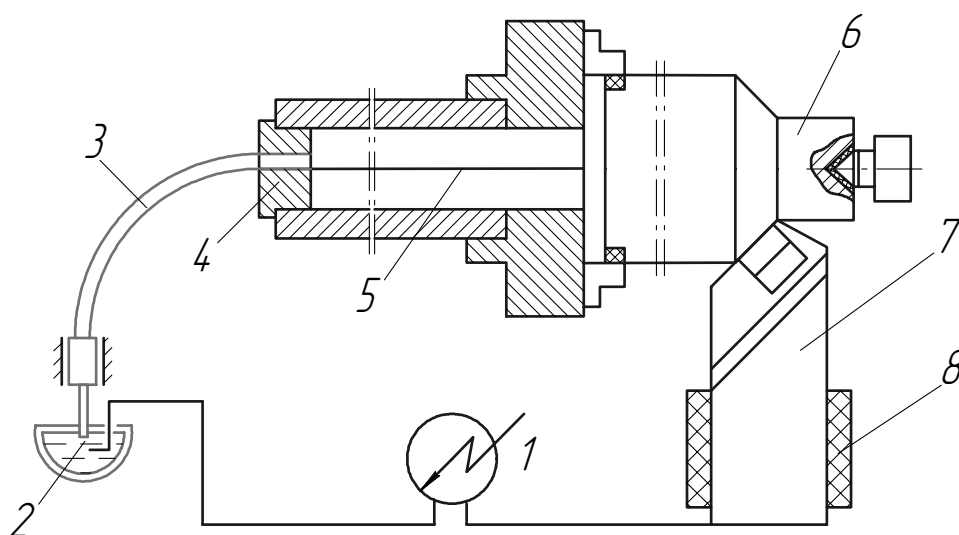


Рис. 16.4. Схема измерения температуры резания естественной термопарой

Ещё одним примером схемы измерения температуры резания естественной термопарой является метод двух резцов. В этом случае в качестве термоэлектродов используются резцы из разных материалов. Термо-ЭДС, возникающая вследствие отличия термоэлектронных свойств инструментальных материалов резцов по закону аддитивности не зависит от материала заготовки, которая в этом случае выполняет функцию только электропроводника. По точности этот метод уступает одностороннему, т. к. предполагает одинаковые температуры контактных поверхностей обоих резцов, что невозможно.

Эффективны термопары в виде напыленных или пластинчатых термоэлектродов, которые могут использоваться в зависимости от их количества и схемы размещения как искусственные, полуискусственные и естественные при различных видах обработки (рис. 16.5), в том числе при нетокопроводящих материалах заготовки и инструмента.

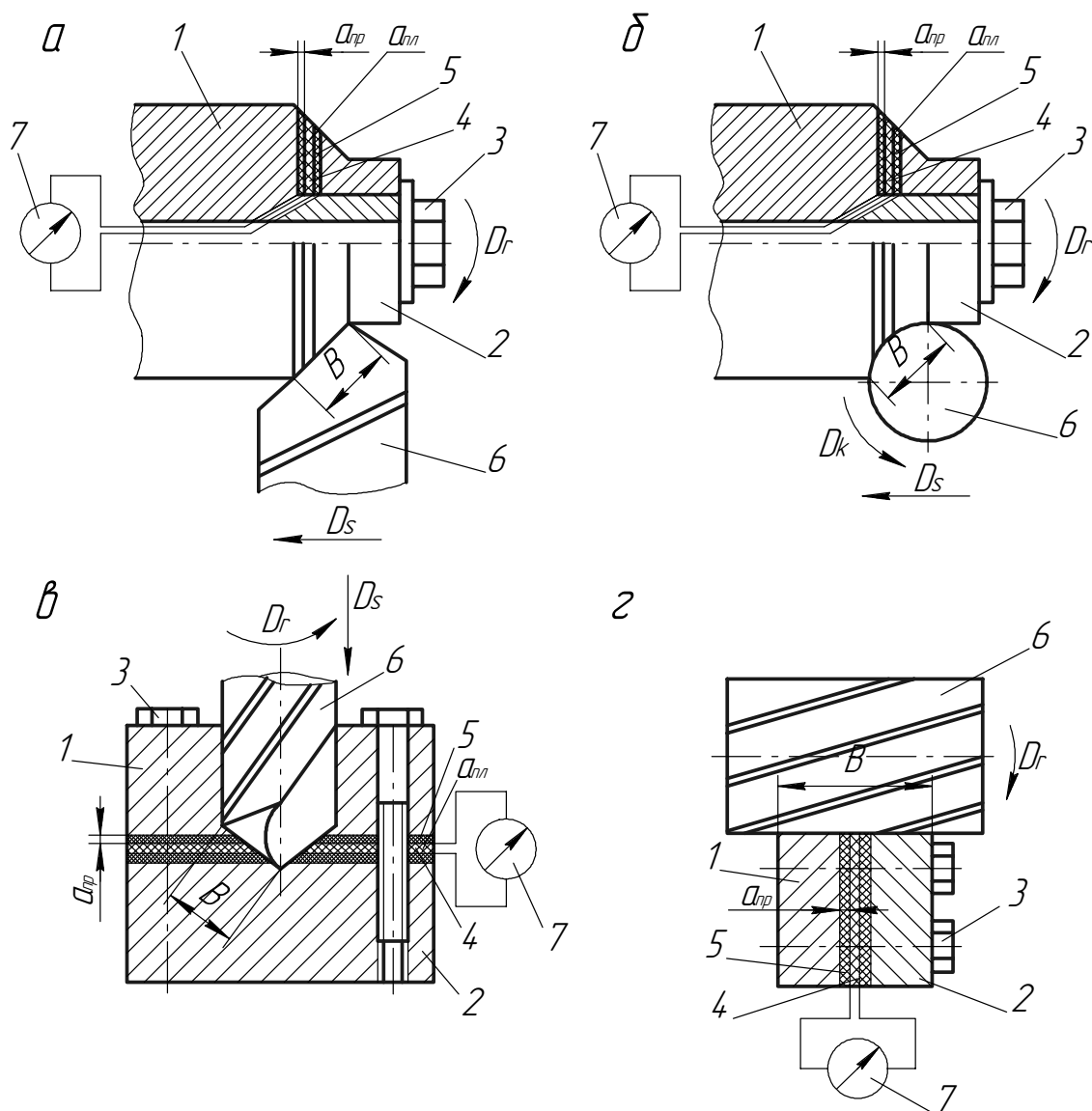


Рис. 16.5. Схемы измерения температуры резания с использованием пластинчатых термопар при обтачивании (а), ротационном точении (б), сверлении (в) и фрезеровании (г):
 1 и 2 – части заготовки; 3 – гайка; 4 – термоэлектрод; 5 – изолятор;
 6 – режущий инструмент

Бесконтактные методы

Калориметрический метод заключается в применении ёмкостей с жидкостью (водой) 1 и для улавливания отлетающей стружки 2, которые устанавливаются под зоной обработки (рис. 16.6, а).

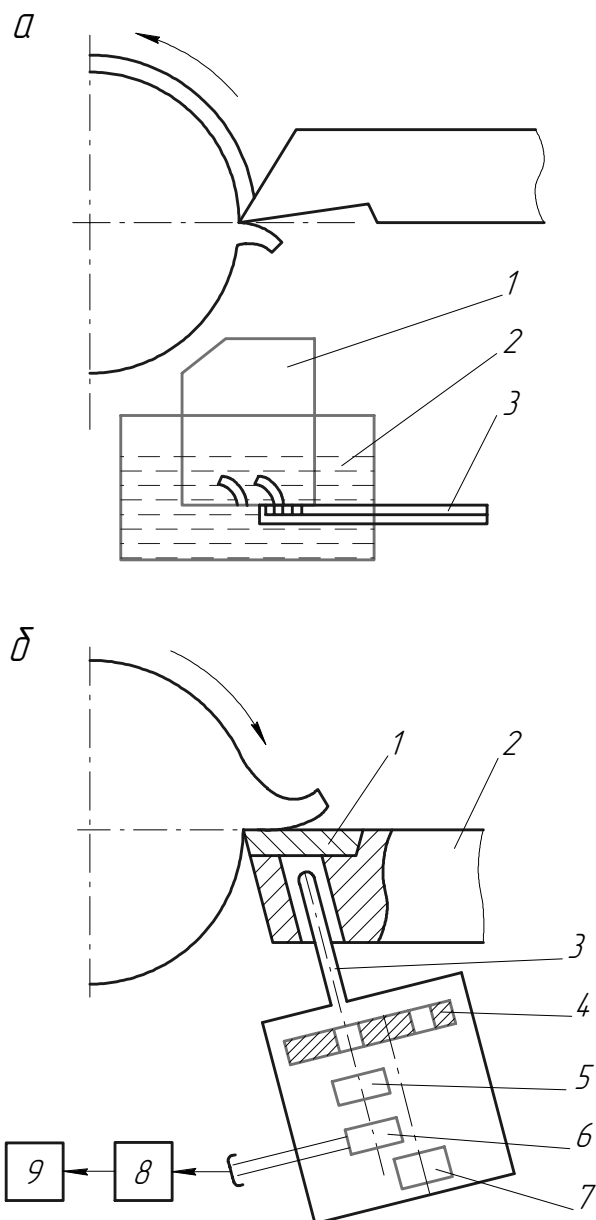


Рис. 16.6. Схемы измерения температуры резания калориметром (а) и радиационным пирометром (б)

После попадания стружки в калориметр, состав воды в нём перемешивается для выравнивания температуры. После перемешивания измеряется температура воды, затем стружка взвешивается на аналитических ве-

сах и по массе стружки, температуре воды в калориметре рассчитывается теплосодержание стружки в калориях и её среднеобъёмная температура:

$$\theta = \theta_{см} + \frac{G_B(\theta_{см} - \theta_B)}{c \cdot G}, \quad (16.1)$$

где $\theta_{см}$ – температура смеси (воды после попадания стружки);

θ_B – начальная температура воды;

G_B – масса воды в калориметре;

G – масса стружки или резца;

c – теплоёмкость стружки или резца.

Радиационный метод основан на измерении уровня инфракрасного излучения в зоне резания радиационными пирометрами (рис. 16.6, б). Режущая пластина 1 резца 2 должна быть прозрачной, например, алмазной, для инфракрасных лучей, которые через светопровод 3 попадают на модулятор 4 и далее через светофильтр на приемник излучения 6. Для привода модулятора 4 используется микродвигатель 7. Инфракрасное излучение усиливается усилителем 8 и регистрируется прибором 9. Этот метод эффективен, однако его применение при резании ограничивается малыми площадями зоны излучения тепла и её закрытостью.

ЛЕКЦИЯ 17

Температурные деформации станочного оборудования. Температурные деформации заготовок. Температурные деформации инструмента

Температурные деформации станочного оборудования

Точность деталей и надежность элементов технологической системы (ТС) зависит от температурных полей и вызванных ими тепловых деформаций в узлах и механизмах оборудования. Изучение тепловых процессов в узлах технологического оборудования и отыскание путей управления этими процессами привлекает все большее внимание конструкторов, технологов и исследователей, поскольку требования к точности изделий и надежности работы станочного оборудования непрерывно возрастают.

Анализ тепловых явлений в технологическом оборудовании состоит из трех этапов: определение мощности источников тепловыделения; расчет или экспериментальное определение температурных полей в узлах и элементах конструкции оборудования; расчет или экспериментальное определение термических деформаций узлов и определение их влияния на точность взаимного расположения инструмента и заготовки, а также на работу механизмов станка.

Для упрощения решения задачи об оценке влияния температурных деформаций на точность обработки обычно рассматривают два периода в работе станка: первый период – от начала пуска станка до достижения теплового равновесия, соответствующий нестационарному тепловому состоянию системы, и второй – от момента теплового равновесия до окончания обработки – стационарное тепловое состояние. Температурные деформации узлов станка определяются их конструкцией, характером нагрева и т. п. Рассмотрим расчет температуры для некоторых наиболее распространенных узлов и деталей.

Тепловыделение и температура в подшипниках. Источником теплообразования в работающем подшипнике является трение между его деталями. Следовательно, суммарная мощность источников тепловыделения:

$$Q = 2\pi Mn, \quad (17.1)$$

где M – момент трения подшипника;

n – частота вращения.

Теплофизические расчеты подшипников обычно необходимы для определения температуры на трущихся поверхностях, расчета количества теплоты, которое уносится смазочной жидкостью, и определения количе-

ства теплоты, поступающей через посадочные поверхности подшипника в другие детали конструкции.

Для подшипника скольжения баланс теплоты равен:

$$Q = Q_{\text{в}} + Q_{\text{от}} + Q_c, \quad (17.2)$$

где $Q_{\text{в}}$, $Q_{\text{от}}$ и Q_c – мощности тепловых потоков, которые поступают соответственно в вал, втулку и смазочную жидкость.

Плотность теплового потока q и температура θ в подшипнике:

$$q = b \cdot \frac{Q_0(1 - \rho\theta) - (c\rho)_c \theta W}{\pi dl}, \quad (17.3)$$

$$\theta = Q_0 \sqrt{\tau} / (A + B\sqrt{\tau}), \quad (17.4)$$

где $A = \frac{\pi^{3/2}}{2} \cdot \frac{\lambda_1}{\sqrt{\omega_1}} \cdot \frac{dl}{bL_B},$

$$B = Q_0 p + (c\rho)_c \omega,$$

Q_0 – мощность тепловыделения при температуре масла, равной условному нулю (температуре окружающей среды);

τ – время распространения теплоты;

λ_1 и ω_1 – теплофизические характеристики материала вала;

d – диаметр вала;

l – длина втулки;

b – коэффициент, характеризующий отношение мощности теплового потока, поступающего в вал, ко всей мощности Q ;

L_B – коэффициент формы втулки и вала;

p – периметр подшипника;

$(c\rho)_c$ – теплостойкость смазки;

W – расход смазки.

Для подшипника качения температура на поверхностях наружного и внутреннего колец и роликов соответственно равна

$$\theta_H = \frac{2(q - q_H)\sqrt{\omega \cdot \tau}}{\lambda\sqrt{\pi}} \cdot L_H, \quad (17.5)$$

$$\theta_B = \frac{2(q - q_B)\sqrt{\omega \cdot \tau}}{\lambda\sqrt{\pi}} \cdot L_B, \quad (17.6)$$

$$\theta_p = \frac{2(q - q_p)\sqrt{\omega \cdot \tau}}{\lambda\sqrt{\pi}} \cdot L_p, \quad (17.7)$$

где $q = \frac{Q}{\pi l(d_H + d_B)}$ – средняя плотность тепловыделения;

q_n , q_v и q_p – плотность тепловыделения соответственно наружным и внутренним кольцами и роликами;

λ и ω – теплофизическая характеристика подшипника;

τ – время распространения теплоты;

L_H , L_B и L_P – коэффициенты формы соответственно для наружного и внутреннего колец и роликов.

Температура и термические деформации ходовых винтов. Ходовые винты нагреваются теплотой, которая выделяется в паре винт – гайка. Момент трения в этой паре:

$$M = 0,5Pd_{cp}tg(\alpha + \rho), \quad (17.8)$$

где d_{cp} – средний диаметр резьбы;

α и ρ – соответственно угол подъема резьбы и угол трения;

P – осевая сила.

Мощность тепловыделения:

$$Q = 2\pi Mn, \quad (17.9)$$

где n – частота вращения винта.

Схематизируя процесс распределения теплоты в винте, можно представить плотность тепловыделения в следующем виде:

$$q = \frac{b \cdot Q}{\pi d_{cp}(l_B + l)}, \quad (17.10)$$

где b – коэффициент, учитывающий распределение теплоты между гайкой и винтом;

l_B и l – соответственно ход и длина гайки.

Температура в ходовом винте:

$$\theta = \frac{2}{\lambda_B \sqrt{\pi}} b P L_B tg(\alpha + \rho) \sqrt{\omega_B i (\tau_p + \tau_B)}, \quad (17.11)$$

где λ_B и ω_B – теплофизические характеристики материала винта;

τ_p и τ_B – время рабочего и вспомогательного ходов;

i – число рабочих ходов.

Температура валов и шпинделей. Валы и шпинделя станков имеют, как правило, ступенчатую форму и несколько источников тепловыделения (подшипники, зубчатые колеса и т. д.).

Тепловая мощность подшипника:

$$Q_{II} = q_{II} \cdot F_{II}. \quad (17.12)$$

Тепловая мощность зубчатого колеса:

$$Q_K = \frac{Q \cdot D_K}{D_K + D_{III} \cdot L_K / L_{III}}, \quad (17.13)$$

где Q – мощность тепловыделения в зубчатой передаче;

D_K и D_{III} – диаметры делительных окружностей колеса и шестерни;

L_K и $L_{Ш}$ – коэффициенты формы колеса и шестерни.

Валы и шпиндели рассматриваются как стержни конечной или бесконечной длины, а источники тепловыделения – как двумерные.

Плотность теплового потока от подшипника или зубчатого колеса:

$$q_i = 4Q_i(\pi d_0^2). \quad (17.14)$$

Температура в стержне (вале):

$$\theta_i = \frac{q_i \sqrt{\omega}}{2\lambda \sqrt{\beta}} \exp \left[-|y_i - y| \frac{\sqrt{\beta}}{\omega} \right], \quad (17.15)$$

где y_i – координата, характеризующая положение источника;

y – координата точки стержня;

$\beta = 2\alpha r / (cpF)$ – коэффициент, учитывающий теплообмен вала с окружающей средой;

α – коэффициент теплоотдачи;

r и F – периметр и площадь сечения стержня.

Температура в стержне определяется для каждого источника теплоты, а затем суммируется.

Аналогично можно определять температуры и описывать температурные поля в других деталях и узлах станков, в том числе в станинах, стойках, коробках и т. д. Например, для плоскошлифовального станка с вертикальным шпинделем (рис. 17.1) наиболее нагретыми узлами являются шпиндельная бабка 2, станина 5 и стол 4. Под действием тепловых потоков q_1 и q_2 произойдет деформирование стойки 1 и изменение положения круга 3 относительно стола 4. Плотности тепловых потоков q_1 и q_2 рассчитывается путем независимого рассмотрения теплообмена в бабке и станине.

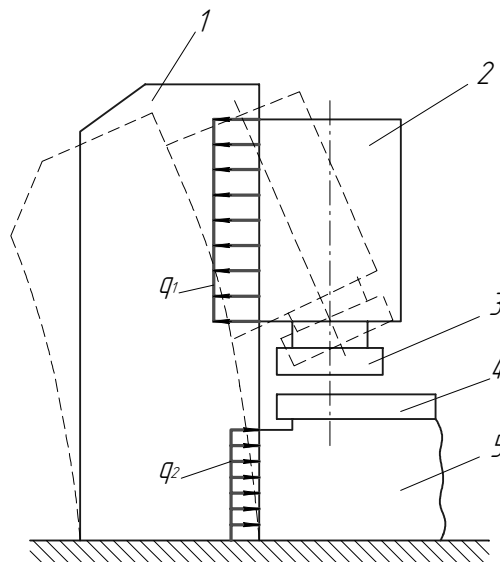


Рис. 17.1. Температурная деформация стойки плоскошлифовального станка, вызванная тепловым потоком плотностью q_1 на шпиндельной бабке и потоком плотностью q_2 на станине

Температурные деформации узлов станков под воздействием внутренних источников могут достигать значительных величин. Например, разность температур в шпиндельной бабке может изменяться от 10 до 15 °С (рис. 17.2, а), а смещение шпинделя в вертикальной и горизонтальной плоскостях – от нескольких сотых до десятых долей миллиметра. Температура валов и шпинделей обычно на 30 – 40 % выше средней температуры корпуса, в котором они смонтированы.

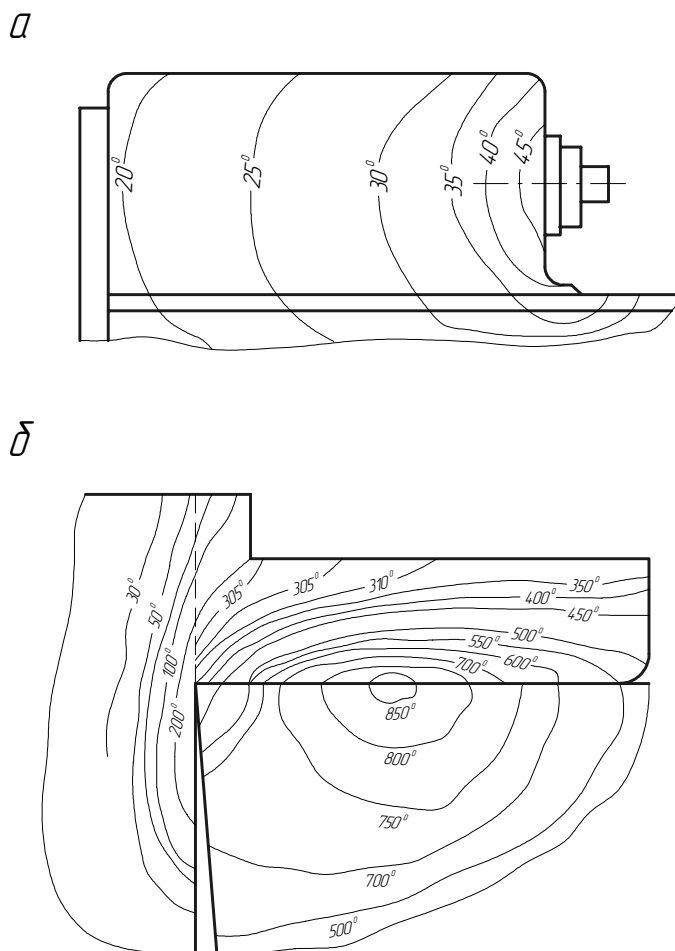


Рис. 17.2. Температурные поля и деформации в шпиндельной бабке станка (а), заготовке и инструменте (б)

Существенное влияние на температурные деформации станка оказывает окружающая среда и внешние источники теплоты. Например, нагрев солнечными лучами бабки круглошлифовального станка в течение двух часов приводит к отклонению от прямолинейности перемещений стола на 4...5 мкм. Аналогичное воздействие могут оказывать стоящие рядом станки или установки, имеющие мощные источники теплоты. Для уменьшения этого влияния наиболее эффективна установка оборудования в термостатных помещениях.

Температурные деформации заготовок

На температурные деформации и напряжения заготовки наибольшее влияние оказывает теплота, образуемая при резании (рис. 17.2, б).

При обработке массивных заготовок этими деформациями можно пренебречь, а при изготовлении тонкостенных деталей – эти деформации сопоставимы с допусками 7-го качества.

В процессе обработки наблюдаются три периода распространения теплоты и развития температурных деформаций заготовки: 1) сравнительно небольшой нагрев заготовки с холодным слоем металла перед резцом (неустановившийся теплообмен); 2) установившийся теплообмен, когда температурные деформации возрастают до определенного уровня и остаются постоянными; 3) завершающий этап, когда температура необработанного участка заготовки повышается из-за отражения тепловой волны и температурные деформации растут.

Для устранения температурных деформаций заготовок наиболее эффективно применение СОЖ и их охлаждение в холодильнике.

Температурные деформации инструмента

Температурные деформации, например, резца проявляются в его удлинении, которое можно определять по формуле:

$$\Delta L = C(L/A)\sigma_B t S^{0.75} v^{0.5}, \quad (17.16)$$

где C – постоянный коэффициент, при $t \leq 1,5$ мм, $S \leq 0,2$ мм/об,

$v = 100 \dots 200$ м/мин, $C = 45$;

L – вылет резца;

A – площадь поперечного сечения державки резца;

σ_B – временное сопротивление материала державки.

Удлинение резца может достигать 30...50 мкм. Характерный вид температурного поля в инструменте представлен на рис. 17.2, б.

Уменьшения тепловых деформаций в элементах ТС можно обеспечить путем: 1) снижения тепловыделения; 2) интенсификацией отвода тепла; 3) рационализацией взаимного расположения элементов ТС; 4) применения системы компенсаторов. Снижение тепловыделения в узлах оборудования достигается, например, заменой подшипников скольжения на аэростатические опоры. Интенсифицировать отвод теплоты позволяет применение СОЖ. Снижению тепловых деформаций способствует рациональное расположение шпиндельного узла, как правило, симметричное по отношению к колонне. Компенсация тепловых деформаций осуществляется путем использования некоторых конструктивных решений и адаптивных устройств.

ЛЕКЦИЯ 18

Изнашивание и износ режущего инструмента. Виды изнашивания. Характер износа различных инструментов

Изнашивание и износ режущего инструмента

Действующие на инструмент в процессе резания силы, напряжения и температура приводят к потере им режущих свойств. Потеря режущей способности инструмента вызывается *изнашиванием* его контактных (передней и задней) поверхностей. Изнашивание проявляется в *износе* лезвия инструмента. Под *износом* понимают величину, характеризующую изменение формы и размеров режущего инструмента (лезвия) вследствие изнашивания при резании.

Неисправный инструмент снижает качество обработки, в частности увеличивает шероховатость и ухудшает состояние поверхностного слоя детали. Поэтому важно знать момент снятия инструмента со станка для его восстановления. С точки зрения себестоимости (C) процесса резания существует оптимальное время (τ_0) работы инструмента до восстановления (рис. 18.1).

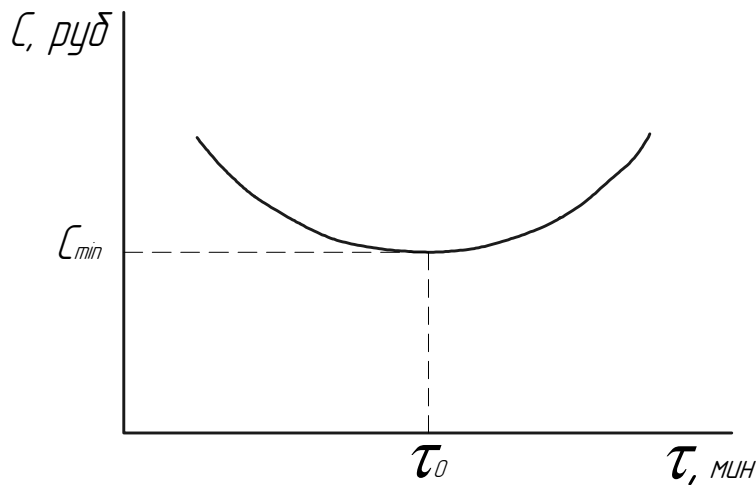


Рис. 18.1. Зависимость себестоимости обработки от времени работы инструмента

До значения τ_0 затраты на инструмент окупаются, а дальнейшая эксплуатация инструмента (после τ_0) приводит к удорожанию процесса обработки.

Следует отметить, что пока ещё нет строгой теории изнашивания режущих инструментов. Достигнутые на настоящее время результаты исследований в этой области основываются на существующих представлениях науки о трении и износе (трибологии). Чаще всего при резании выделяют следующие виды изнашивания инструмента: абразивно-механическое, адгезионно-диффузионное, окислительное, термоусталостное. Рассмотрим механизм проявления этих видов изнашивания.

Виды изнашивания

Абразивно-механическое изнашивание

Модель абразивно-механического изнашивания представлена на рис. 18.2, а. При движении стружки по передней поверхности инструмента микровыступы приконтактной поверхности стружки взаимодействуют с аналогичными микровыступами передней поверхности. Вследствие большого давления и высокой температуры на площадке контакта происходит разрушение взаимодействующих микровыступов. Это разрушение проявляется в пластическом деформировании и срезании. Наиболее вероятное срезание выступов имеет место на стружке, однако за счёт циклического воздействия на микровыступы передней поверхности инструмента имеют место разрушения инструментального материала. С течением времени происходит сглаживание микровыступов инструмента, вследствие чего увеличивается фактическая площадь контакта инструмента со стружкой и заготовкой. Снижается контактное давление, и интенсивность изнашивания уменьшается. Продукты износа, попадая между стружкой и инструментом, измельчаются в порошок и, окисляясь под действием температуры, превращаются в «абразив», который определяет дальнейший износ инструмента.

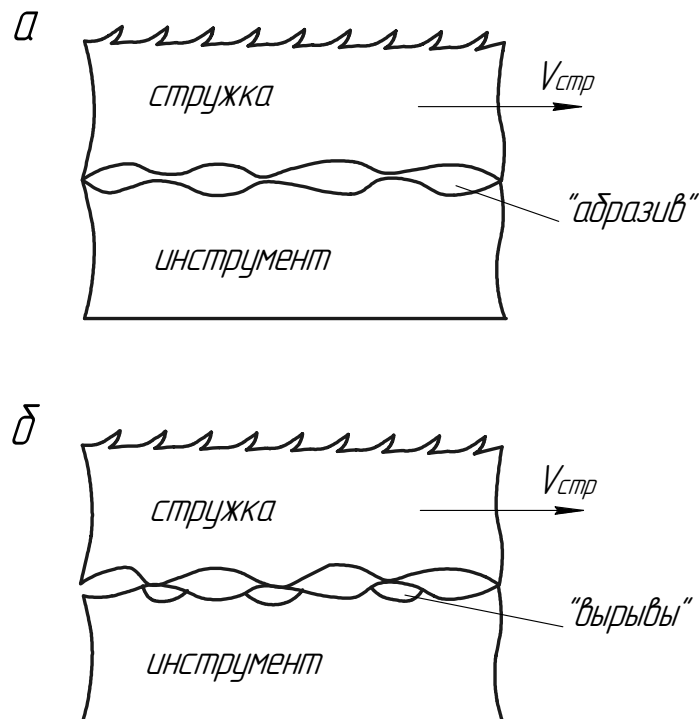


Рис. 18.2. Схемы механизмов абразивного (а) и адгезионно-диффузионного (б) изнашивания лезвия инструмента при контакте со стружкой

В зависимости от времени работы различают три этапа изнашивания инструмента (рис. 18.3):

I этап – интенсивное изнашивание;

II этап – равномерное изнашивание за счёт воздействия окислов;

III этап – катастрофическое изнашивание.

Режущий инструмент целесообразно эксплуатировать до наступления катастрофического износа.

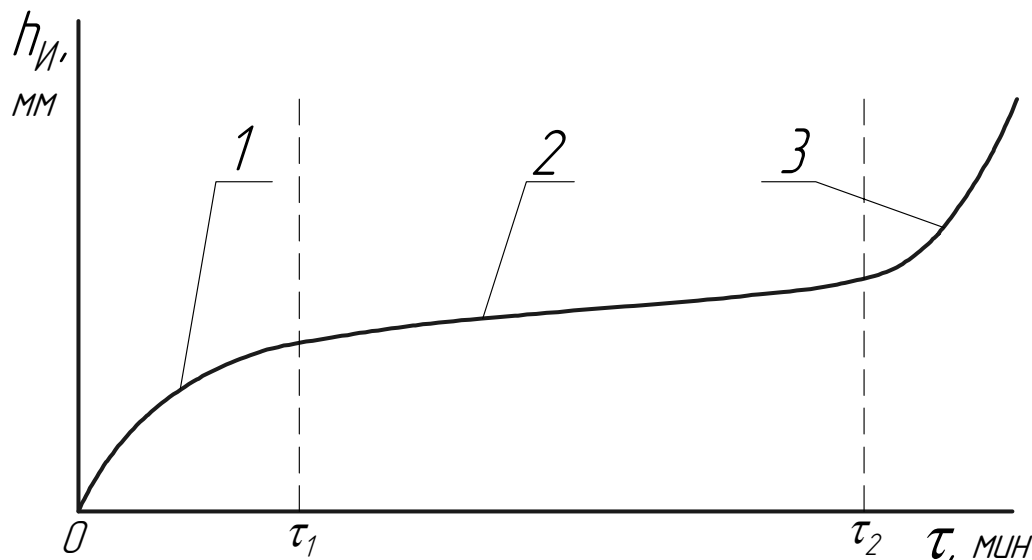


Рис. 18.3. Зависимость величины фаски износа лезвия инструмента от времени обработки:
1 – интенсивное изнашивание, 2 – равномерное изнашивание,
3 – катастрофическое изнашивание

Адгезионно-диффузионное изнашивание

Адгезионно-диффузионное изнашивание – это два вида изнашивания (адгезионное и диффузионное), объединённых одновременным воздействием на инструмент в процессе резания.

Адгезией называется молекулярное схватывание взаимодействующих тел под влиянием высокой температуры и большого давления. Под *адгезионным изнашиванием* лезвия понимают отрыв силами адгезии мельчайших частиц инструментального материала в процессе трения инструмента с обрабатываемым материалом.

Диффузией называется взаимное проникновение атомов двух взаимодействующих тел. Высокие температуры, большие пластические деформации и адгезия в зоне контакта при высоких скоростях резания в сильной степени способствуют взаимному диффузионному растворению инструментального и обрабатываемого материалов. Диффузионное изнашивание про-

является в следующем: 1) в удалении стружкой диффундирующих частиц инструментального материала; 2) в проникновении частиц обрабатываемого материала в инструментальный, что уменьшает прочность инструмента; 3) во взаимном растворении частиц инструментального и обрабатываемого материалов, что увеличивает степень их химического «родства» и влияние адгезии (к адгезии более склонны «родственные» материалы).

Рассмотрим механизм адгезионно-диффузионного изнашивания (рис. 18.2, б). На взаимодействующих микровыступах передней поверхности инструмента и стружки возникает явление адгезии. Это явление приводит к дополнительным разрушениям в материалах стружки и инструмента при их относительном движении. Разрушения происходят чаще всего в плоскости схватывания и в материале стружки, однако разрушения наблюдаются и в поверхностных слоях лезвия инструмента вследствие циклического воздействия сходящей стружки. В результате адгезионного износа на поверхности инструмента появляются «вырывы». С повышением температуры резания число очагов схватывания увеличивается, что, казалось бы, должно привести к усилению адгезионного износа, однако «размягчение» обрабатываемого материала уменьшает разрушения инструментального материала. И, тем не менее, при больших температурах (более 800 °С) наблюдается интенсивное увеличение износа инструмента. Этот износ определяется влиянием диффузии. Диффузия увеличивается с увеличением температуры и времени контакта. Степень влияния температуры на диффузию значительно выше степени влияния времени контакта, поэтому с увеличением скорости резания диффузия резко увеличивается.

Характер износа различных инструментов

Износ инструмента проявляется в виде лунки на его передней поверхности, фаски на задней поверхности и радиуса закругления режущей кромки. Образование лунки на передней поверхности и её последующее развитие несколько увеличивает передний угол и поэтому влечёт за собой уменьшение деформации и сил на передней поверхности инструмента. Однако это уменьшение невелико и на технологических характеристиках процесса стружкообразования почти не сказывается.

Увеличение фаски износа на задней поверхности способствует интенсификации на этой поверхности адгезионных процессов, увеличению силы трения и силы нормального давления. При этом возрастают деформация, упрочнение поверхностного слоя изделия, ухудшается качество, повышается температура резания.

Увеличение радиуса закругления режущей кромки ведёт к увеличению толщины слоя, подминаемого под заднюю поверхность, что повышает нормальные контактные напряжения и силу. В итоге наблюдаются те же явления, что и при увеличении фаски износа.

В зависимости от условий резания различным оказывается внешний вид изношенного инструмента (рис. 18.4). Например, инструменты, работающие при низких скоростях резания (протяжки, фасонные и строгальные резцы) изнашиваются в основном по режущей кромке. Изнашивание сверл наблюдается по задней поверхности (рис. 18.4, б). Фрезы изнашиваются по режущей кромке и задней поверхности (рис. 18.4, в).

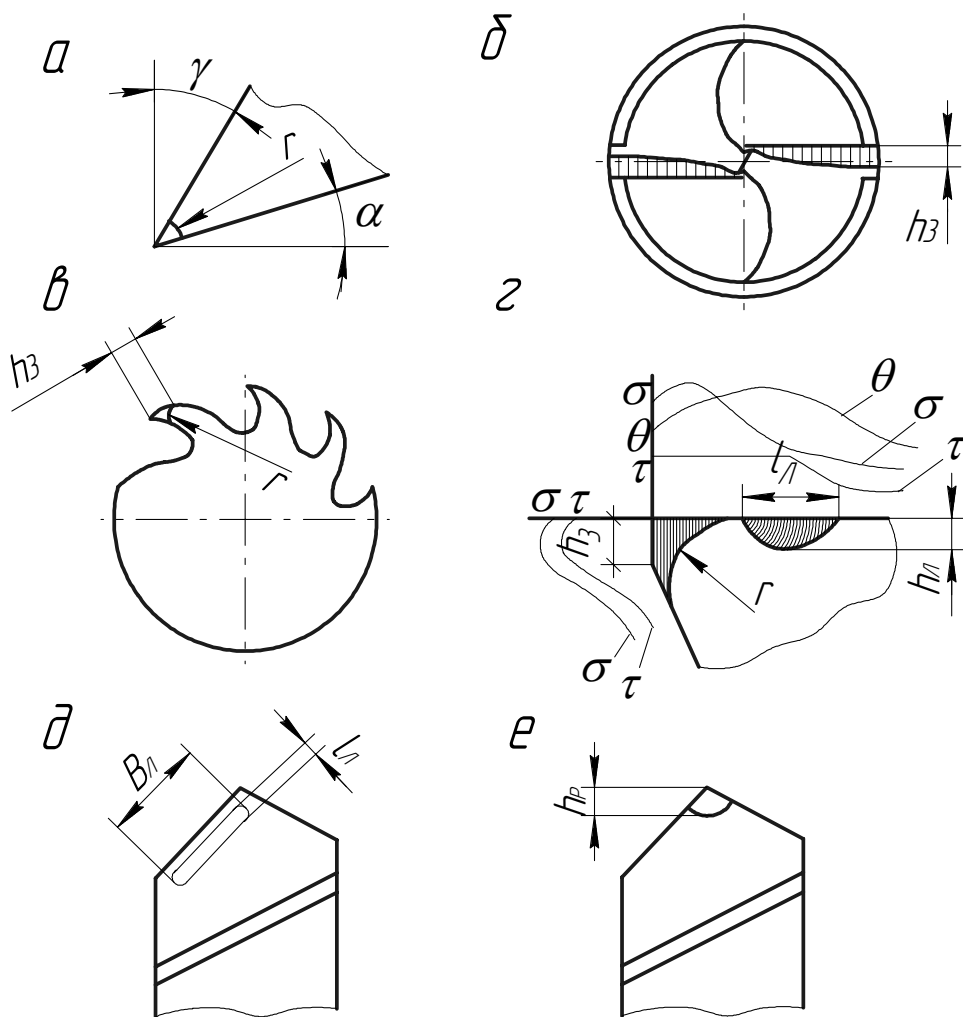


Рис. 18.4. Схемы износа инструментов в виде закругления режущей кромки с радиусом r , фаски h_3 , лунки l_n :
 а – работающих при низких скоростях резания; б – сверл; в – фрез;
 г, д, е – токарных резцов

Высокоскоростной фрезерный инструмент изнашивается в основном за счёт абразивно-механического воздействия. Адгезионно-диффузионное изнашивание на фрезях не проявляется, т. к. температура резания при фрезеровании в одинаковых с точением условиях меньше в 2...3 раза.

Наиболее сложным образом изнашиваются токарные резцы (рис. 18.4, г...е). У токарных резцов изнашивание проявляется в виде радиуса закругления режущей кромки, площадки (фаски) износа по задней поверхности и лунки на передней поверхности.

Закругление режущей кромки происходит по причине ее осыпания в результате вибраций в процессе резания и механического изнашивания. Износ по задней поверхности является результатом абразивно-механического изнашивания. Появление лунки обусловлено максимальной температурой на передней поверхности, значения которой могут достигать 1000 – 1500 °С. Это и приводит к интенсификации адгезионно-диффузионного изнашивания инструмента.

Мерой изношенности инструмента могут служить линейный и массовый износы. Линейный износ оценивается по величине площадки износа на задней поверхности h_n и глубине h_d лунки износа на передней поверхности.

При чистовой обработке наибольший интерес представляет износ инструмента, измеряемый в направлении перпендикуляра к обработанной поверхности. Такой характер износа называется *размерным*. Величина размерного износа определяет увеличение или уменьшение размера обрабатываемой поверхности детали по мере изнашивания инструмента. Критерий линейного износа достаточно надёжен при разработке промышленных норм допускаемых износов и норм расхода инструмента на переточки. Для исследования физической природы изнашивания более объективной характеристикой является *массовый износ*, который определяется как произведение объёма изношенной части инструмента на плотность инструментального материала.

ЛЕКЦИЯ 19

Предельное состояние инструмента. Критерии предельного состояния (отказа). Стойкость инструмента. Разрушение инструмента как результат образования и развития трещин

Предельное состояние инструмента. Критерии предельного состояния (отказа). Стойкость инструмента

При эксплуатации инструмента по мере его изнашивания наступает такой момент, когда дальнейшее резание инструментом должно быть прекращено, а инструмент отправлен на переточку. *Работоспособное состояние режущего инструмента (лезвия)* характеризуется таким состоянием, при котором он способен выполнять обработку резанием, согласно установленным в нормативно-технической документации условиям. При наступлении предельного состояния инструмента происходит изменение некоторых показателей процесса резания, например, изменение силы и температуры резания, появление вибраций, ухудшение качества обработки и т. д. Численные значения этих показателей процесса, по которым можно определить степень изношенности инструмента, названы *критериями предельного состояния, затупления или отказа*.

Критерий затупления – критерий отказа режущего инструмента (лезвия) характеризуется максимально допустимым значением износа режущего инструмента (лезвия), по мере достижения которого наступает его отказ.

Критерий отказа определяется в зависимости от требований к обработке при выполнении конкретной технологической операции. К критериям отказа относятся:

1. Линейный размер изношенной площадки на лезвии инструмента.
2. Сила резания.
3. Температура резания.
4. Шероховатость обработанной поверхности.
5. Уровень вибраций.
6. Уровень шума.

Наиболее простым и доступным является критерий линейного размера изношенной площадки на лезвии инструмента – $h_{и} = 0,4...0,8$ мм для чернового точения.

Силовой и температурный критерии используются в основном в лабораторных условиях. При увеличении износа инструмента увеличиваются сила и температура резания.

При чистовой обработке используется критерий шероховатости, при котором об износе инструмента судят по возникновению блестящих полосок на обработанной поверхности или другим поверхностным дефектам.

Удобными на практике являются вибрационный и шумовой критерии, т. к. они наблюдаются визуально или «на слух», или с использованием соответствующей аппаратуры.

Работоспособность инструмента характеризуется *надёжностью*. Надёжность режущего инструмента – комплексное свойство, включающее безотказность, долговечность, восстанавливаемость и ремонтпригодность режущего инструмента.

При эксплуатации инструмента используется понятие *стойкости инструмента*. Под стойкостью инструмента понимают его способность работать до наступления катастрофического износа. Стойкость характеризуется периодом стойкости. *Период стойкости* режущего инструмента (лезвия) – время резания новым или восстановленным режущим инструментом (лезвием) от начала резания до отказа.

Период стойкости токарных резцов (стойкость): $T = 40 \dots 80$ мин – экономическая стойкость стали P18. Период стойкости фрез: $T = 200 \dots 400$ мин.

Период стойкости:

$$T = f(c_0, c_u, c_{COЖ}, v, s, t, \gamma, \alpha, \lambda, \varphi \dots).$$

Скорость резания:

$$v = f(T, c_0, c_u, c_{COЖ}, s, t, \gamma, \alpha, \lambda, \varphi \dots).$$

На практике установлена следующая связь стойкости с элементами режима резания:

$$T = \frac{C_T \cdot k_T}{v^{z_T} \cdot s^{y_T} \cdot t^{x_T}},$$

где C_T – коэффициент, зависящий от условий обработки;

k_T – поправочный коэффициент на отличие условий экспериментатора от условий технолога;

z_T, y_T, x_T – дробные показатели степени;

v, s и t – скорость, подача и глубина резания.

Обычно из этой зависимости выражают скорость резания:

$$v^{z_T} = \frac{C_T \cdot k_T}{T \cdot s^{y_T} \cdot t^{x_T}},$$

$$v = \frac{C_T^{\frac{1}{z_T}} \cdot k_T^{\frac{1}{z_T}}}{T^{\frac{1}{z_T}} \cdot s^{\frac{y_T}{z_T}} \cdot t^{\frac{x_T}{z_T}}},$$

$$v = \frac{C_v \cdot k_v}{T^m \cdot s^{y_v} \cdot t^{x_v}},$$

где $C_v = C_T^{\frac{1}{z_T}}$, $k_v = k_T^{\frac{1}{z_T}}$,

$$y_v = \frac{y_T}{z_T}, \quad x_v = \frac{x_T}{z_T},$$

$m = \frac{1}{z_T}$ – показатель относительной стойкости, характеризующий интен-
сивность изменения скорости резания в зависимости от изменения

стойкости инструмента.

По этой формуле производятся расчёты скорости резания, которая обеспечивает заданную стойкость инструмента.

Для построения зависимости стойкости инструмента от скорости резания определяют износ инструмента при различных значениях скорости резания (рис. 19.1). Затем при заданном оптимальном значении износа $h_{\text{опт}}$ определяют период стойкости T для каждого значения скорости.

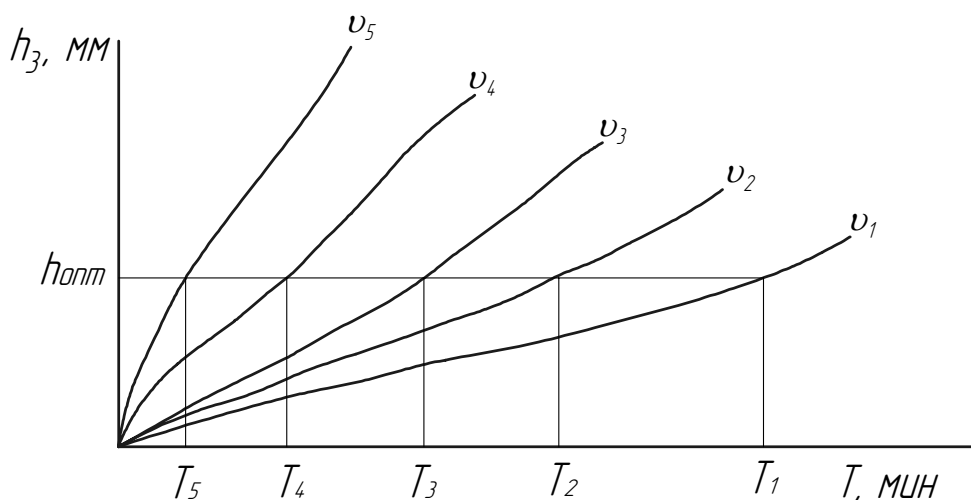


Рис. 19.1. Зависимость износа инструмента от времени обработки

Связь между скоростью резания и периодом стойкости графически имеет характеристику убывающей кривой, напоминающей гиперболу, во многих случаях на ней имеются ярко выраженные экстремумы (рис. 19.2, а).

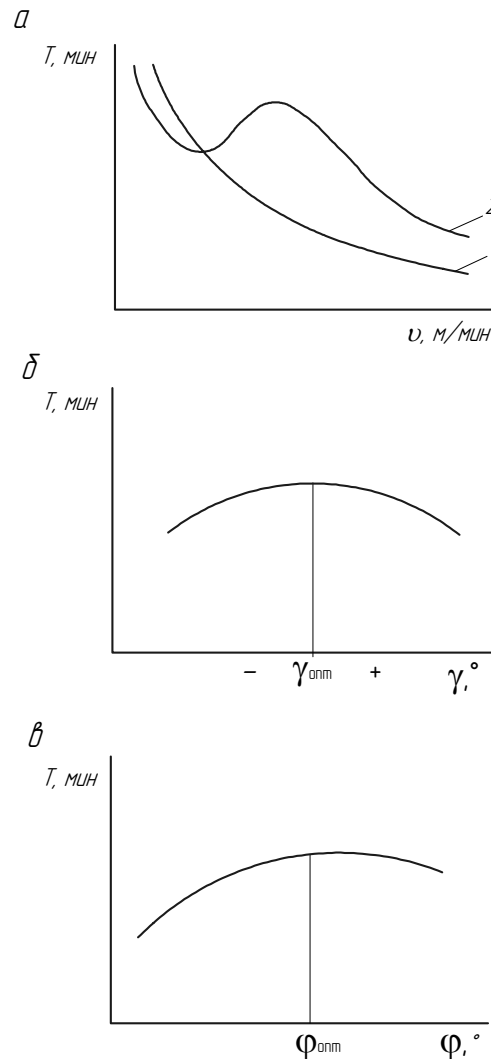


Рис. 19.2. Зависимость периода стойкости инструмента от скорости резания (а), переднего угла γ (б) и угла в плане ϕ (в):
1 – резание без нароста; 2 – резание с наростом

Для объяснения немонотонности зависимости $T = f(v)$ предложены различные гипотезы, большинство из которых связывают с изменением интенсивности изнашивания режущего инструмента, с возможными изменениями, которые претерпевают механические свойства обрабатываемого материала и материала режущего инструмента. Так, максимальная стойкость инструмента из ВК8 в интервале $\theta = 1020 \dots 1070 \text{ К}$ объясняется профессором Зоревым Н.Н. снижением интенсивности адгезионно-усталостного изнашивания, вследствие благоприятного изменения соот-

ношения твёрдостей обрабатываемого и инструментального материалов, уменьшением хрупкости и увеличением сопротивления циклическим и контактными нагрузкам твёрдого сплава. Падение стойкости твёрдосплавного инструмента при $\theta \geq 1070$ К, связывается с ростом интенсивности диффузионного изнашивания. Рассмотренный механизм уменьшения адгезионно-усталостного изнашивания с постепенным его переходом в диффузионный неприемлем для быстрорежущих сталей, т. к. их максимальная стойкость T отвечает температуре $\theta = 540 - 600$ К, тогда как диффузионный износ начинается с температуры ≈ 900 К.

Пики стойкости инструмента профессором Лоладзе Т.Н. связываются также с изменением механизма адгезионно-усталостного изнашивания, профессором Талантовым Н.В. – с температурно-деформационными условиями пластического деформирования металла в зоне контактного взаимодействия, профессором Макаровым А.Д. – с принципом постоянства оптимальной температуры резания для данной пары инструмент – деталь. Профессор Аваков А.А. указывает на возможность принципиальной общности причин изменения стойкости режущего инструмента при увеличении скорости резания и немонотонного характера зависимости износостойкости от скорости скольжения при обычном трении. Процессы, происходящие при резании в поверхностных слоях режущих кромок инструмента, и приводящие к появлению пиков стойкости, контролируются преимущественно малыми упруго-пластическими деформациями (микропластичностью).

Наибольшее влияние на стойкость T оказывает скорость резания v , затем подача S и глубина резания t через повышение температуры. Из этого следует, что нужно стремиться работать с большим отношением ширины и толщины среза b/a . При больших b увеличивается теплоотвод. С увеличением переднего угла γ падают сила P_z и температура резания θ , но ослабляется лезвие и ухудшаются условия отвода тепла, что приводит к снижению T . При тяжёлых условиях обработки угол γ – отрицательный. С увеличением отрицательных значений γ растёт P_z и θ . Вначале по мере увеличения переднего угла γ уменьшается коэффициент трения f и силы трения, поэтому растёт T (рис. 19.2, б). При дальнейшем увеличении γ угол заострения лезвия β уменьшается, что снижает прочность резца и приводит к снижению стойкости. С изменением угла в плане ϕ изменяется b/a , при увеличении ϕ соответственно уменьшается b/a (рис. 19.2, в). При увеличении ϕ b/a уменьшается и при $\phi = 90^\circ$ b/a – минимально, уменьшение угла при вершине ε приводит к росту θ и падению T . Следовательно, ϕ должен быть также как можно меньше, однако при этом растёт составляющая P_y . При малых значениях вспомогательного угла в плане ϕ_1 , увеличивается сила трения и износ, поэтому при увеличении ϕ_1 стойкость растёт, однако

ухудшаются условия теплоотвода, и уменьшается прочность лезвия. Чем больше угол наклона режущей кромки ($+\lambda$), тем лучше отвод тепла, при $+\lambda$ лезвие инструмента более прочное.

Разрушение инструмента, как результат образования и развития трещин

По современным представлениям макроскопическое разрушение является результатом постепенного развития и накопления микротрещин, которые с увеличением внешней нагрузки сливаются в макротрещину. Процесс зарождения и развития трещин развивается во времени, т. е. зависит от продолжительности приложения нагрузки.

На практике встречаются два вида хрупкого разрушения режущего инструмента: выкрашивание режущих кромок и сколы режущего лезвия. *Выкрашивание* (pitting) – процесс образования ямок на поверхности трения в результате отделения относительно малых частиц материала при усталостном изнашивании. Выкрашивание – одна из форм катастрофического изнашивания. Выкрашивание в некоторых случаях связано с поверхностными дефектами инструментального материала, неоднородностью структуры, остаточными напряжениями и т. д. Наряду с этим выкрашивание связано с изменением напряженного состояния в переходных процессах резания – при входе и выходе инструмента из контакта.

Сколы проявляются в отделении относительно большого объема режущего лезвия инструмента, соизмеримого с длиной контакта стружки с передней поверхностью, а по ширине соизмеримого с шириной лезвия.

Опыты показали, что для заданного обрабатываемого материала, скалывание режущего лезвия инструмента в сильной степени зависит от его формы и главным образом определяется углом заострения β , передним углом γ и главным углом в плане φ . Из режимов резания толщина среза оказывает наибольшее влияние на скалывание. Ширина среза действует в значительно меньшей степени. Скорость резания не оказывает столь существенного влияния, как толщина среза.

Для повышения износостойкости режущих инструментов используются:

1) новые инструментальные материалы, в том числе износостойкие покрытия;

2) новые конструкции инструментов для станков с ЧПУ, ГАП и т. п.;

3) новые стандарты, соответствующие уровню зарубежных фирм;

4) повышение точности изготовления инструментов;

5) комбинированные инструменты;

6) неперетачиваемые пластины;

7) ротационные инструменты.

ЛЕКЦИЯ 20

Качество обработанной поверхности детали. Влияние на качество обработки режимов резания и геометрических параметров инструмента

Качество обработанной поверхности детали

Под *качеством детали* понимают свойства её поверхностного слоя, которые формируются в результате воздействия на поверхность одного или нескольких последовательно применяемых технологических методов обработки. Качество обработанной поверхности характеризуется *шероховатостью и волнистостью*, а также физико-механическими свойствами поверхностного слоя, такими как *наклеп и остаточные напряжения*.

Шероховатостью поверхности называется совокупность неровностей с относительно малыми шагами, образующая рельеф поверхностей детали и рассматриваемая на определённой (базовой) длине.

Под *волнистостью* поверхности понимают совокупность периодически чередующихся возвышенностей и впадин, изменяющихся примерно по синусоидальному закону. Расстояние между смежными возвышенностями или впадинами превышает принимаемую при измерении шероховатости базовую длину.

Поверхность детали характеризуется макрогеометрией, микрогеометрией и субмикрогеометрией. К макрогеометрии можно отнести неровности на больших участках поверхности, к микрогеометрии относятся отклонения на участке примерно 1 мм^2 (шероховатость) и к субмикрогеометрии относятся неровности, обусловленные несовершенством внутреннего строения металла. Субмикроскопический рельеф рассматривается на участках поверхностей от одного до нескольких микрометров.

Шероховатость оценивается критерием R_z или высотой неровностей (рис. 20.1):

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 H_{i \max} + \sum_{i=1}^5 H_{i \min} \right), \quad (20.1)$$

где $H_{i \max}$ и $H_{i \min}$ – соответственно максимальные и минимальные отклонения профиля в пределах базовой длины;

а также арифметическим отклонением профиля:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|, \quad (20.2)$$

где y_i – отклонение профиля неровностей от средней линии.

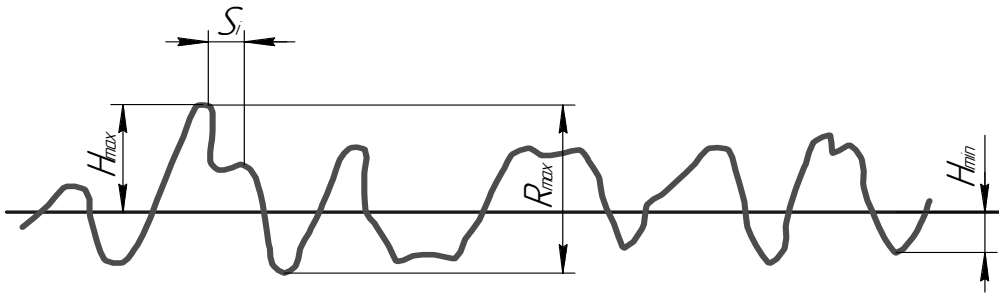


Рис. 20.1. Схема к определению шероховатости поверхности

Влияние на качество обработки режимов резания и геометрических параметров инструмента

Наибольшее влияние на качество обработки оказывают режимы резания и геометрические параметры инструмента. Основные причины образования шероховатости поверхности: 1) геометрия и кинематика процесса резания; 2) упругие и пластические деформации; 3) вибрации.

Определим условия формирования неровностей в связи с геометрическими параметрами обработки.

1. При обработке поверхностей острозаточенным резцом (рис. 20.2, а).

$$S_0 = ac + cb ;$$

$$ac = \frac{ec}{\operatorname{tg}\varphi_1} ; cb = \frac{ec}{\operatorname{tg}\varphi} ;$$

$$S_0 = \frac{h}{\operatorname{tg}\varphi_1} + \frac{h}{\operatorname{tg}\varphi} = h \left(\frac{1}{\operatorname{tg}\varphi_1} + \frac{1}{\operatorname{tg}\varphi} \right) ;$$

высота микронеровностей

$$h = S_0 \frac{\operatorname{tg}\varphi_1 \cdot \operatorname{tg}\varphi}{\operatorname{tg}\varphi_1 + \operatorname{tg}\varphi} . \quad (20.3)$$

Как следует из формулы (20.3), чистовую обработку следует вести на малых подачах и резцом с минимальными углами в плане. В связи с этим новатором Колесовым предложен резец, который снимает остаточные гребешки дополнительной режущей кромкой с $\varphi = 18^\circ$ и производит калибровку поверхности участком режущей кромки с $\varphi = 0^\circ$. Причем длина того участка превосходит значение подачи S_0 и составляет примерно $1,2S_0$. Высококачественное резание с применением таких резцов получило также название силового резания.

2. При обработке поверхностей резцом с радиусом при вершине (рис. 20.2, б)

$$h = r - of = r - \sqrt{r^2 - \frac{S_0^2}{4}};$$

$$(r - h)^2 = r^2 - \frac{S_0^2}{4}; r^2 - 2rh + h^2 = r^2 - \frac{S_0^2}{4};$$

высота неровностей

$$h = \frac{S_0^2}{8r}. \quad (20.4)$$

Как видно из формулы (20.4), для снижения шероховатости надо стремиться к уменьшению подачи и к увеличению радиуса при вершине резца.

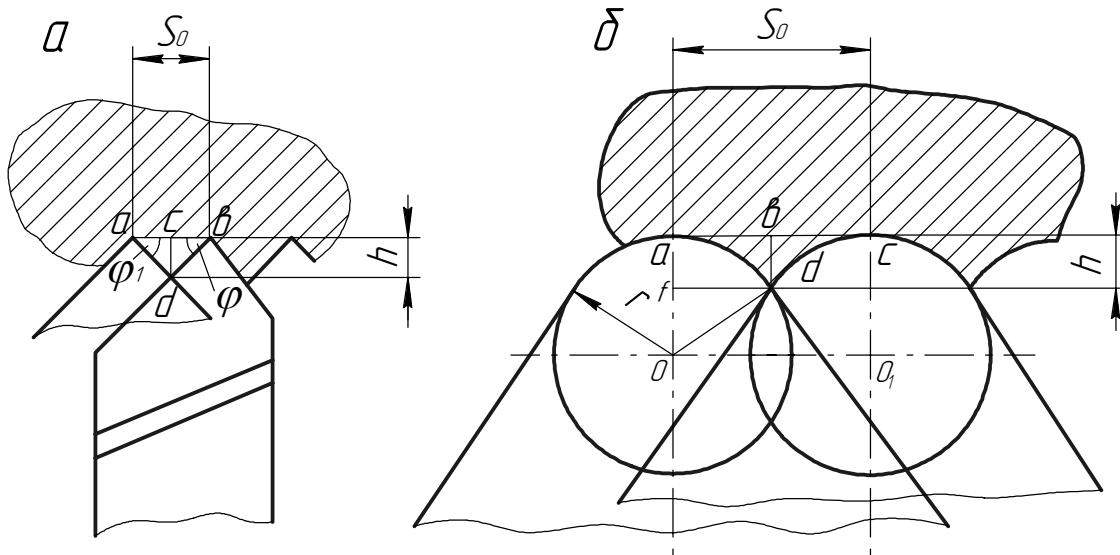


Рис. 20.2. Высота микронеровностей поверхности при токарной обработке:
а – острозаточенным резцом; б – резцом с радиусом при вершине

Шероховатость поверхности зависит от кинематической схемы обработки (см. лекцию 8, Конспект лекций, Ч. 1). В зависимости от схемы формообразование поверхности осуществляется методами копирования, огибания и пересечения. Для каждого из этих методов характерен наиболее выгодный с точки зрения снижения высоты неровностей метод обработки.

Выведенные формулы неточны, т. к. не учитывают процессов, протекающих на передней и задней поверхностях инструмента. Реальное значение R_z с учётом пластического деформирования металла:

$$R_z = R_{z \text{ расч}} + \Delta R_z,$$

где $\Delta R_z = \Delta R_{z n_1} + \Delta R_{z \text{ ynp}} + \Delta R_{z 3}$ – приращение высоты неровностей;

$\Delta R_{z \text{ ynp}} \cong 3\%(\Delta R_{z n_1} + \Delta R_{z 3})$ – приращение от трения по задней поверхности.

Из кинематических параметров обработки наибольшее влияние на высоту неровностей оказывает скорость резания (рис. 20.3, а). С увеличением скорости резания высота неровностей снижается. В диапазоне скоростей, при котором образуется нарост, характерен рост величины неровностей.

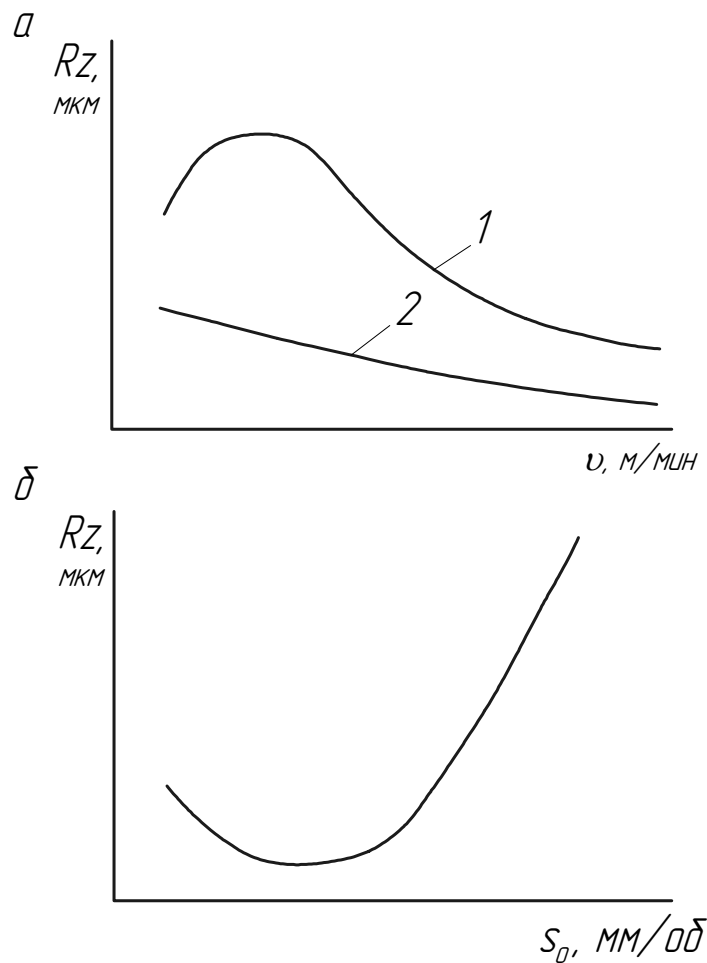


Рис. 20.3. Зависимости шероховатости обработанной поверхности детали от скорости резания (а) и подачи (б):

1 – резание с наростом, 2 – резание без нароста

При увеличении подачи высота неровностей возрастает (рис. 20.3, б). При малых подачах основное влияние оказывают не геометрические факторы, а пластическая и упругая деформации, скорость резания и радиус при вершине резца. При больших значениях подачи на шероховатость оказывают

влияние геометрические факторы (следы движения инструмента). Глубина резания почти не влияет на шероховатость обработанной поверхности.

Из геометрических параметров инструмента наибольшее влияние на шероховатость поверхности, как следует из формул (20.3) и (20.4), оказывает угол в плане φ и радиус закругления режущих кромок. С увеличением φ шероховатость несколько возрастает, а с уменьшением φ_1 микронеровности уменьшаются (см. предыдущую лекцию). Передний угол γ влияет на шероховатость постольку, поскольку он влияет на образование нароста. Поэтому изменение γ особенно заметно влияет на шероховатость обработанной поверхности деталей из углеродистых конструкционных сталей в диапазоне скоростей 20 – 40 м/мин. С уменьшением γ высота нароста возрастает.

Задний угол α влияет на шероховатость значительно меньше, чем γ . Наиболее сильно α влияет в тех случаях, когда обработанная поверхность образуется главной режущей кромкой, например, при протягивании.

На величину шероховатости существенное влияние оказывает структура и твёрдость обрабатываемого металла (наличие феррита, перлита) через образование нароста, износ инструмента, микронеровности режущей кромки инструмента (копируются), жёсткость технологической системы (вибрации), СОЖ (можно уменьшить шероховатость в пределах до одного класса).

Влияние условий обработки на физико-механические свойства поверхностного слоя детали

При обработке заготовок резанием в результате воздействия на поверхностный слой силового и температурного полей в нём возникают пластические деформации и создаются внутренние остаточные напряжения (см. рис. 6.4 и 9.1, Конспект лекций, Ч. 1).

Поверхностная пластическая деформация обуславливает появление *наклёпа* (упрочнения) поверхностного слоя. Наклёп обычно характеризуется микротвёрдостью и рентгенографическими показателями (расширение или размытие интерференционных линий).

Основными причинами возникновения остаточных напряжений являются:

1. Наличие пластической деформации, приводящее к упрочнению и изменению физических свойств металла.

2. Вытягивание кристаллических зёрен металла, которые при этом претерпевают упругую и пластическую деформации растяжения в направлении резания.

3. Нагрев и охлаждение детали при резании, приводящие к развитию остаточных напряжений растягивания во внешних слоях и сжатие в нижележащих слоях металла.

4. Структурные превращения в металле.

При различных методах, режимах механической обработки, а также геометрии инструмента степень и глубина распространения наклёпа оказываются различными (от 30 до 200 мкм).

С увеличением *подачи и глубины резания* наклёп поверхностного слоя увеличивается (рис. 20.4, а).

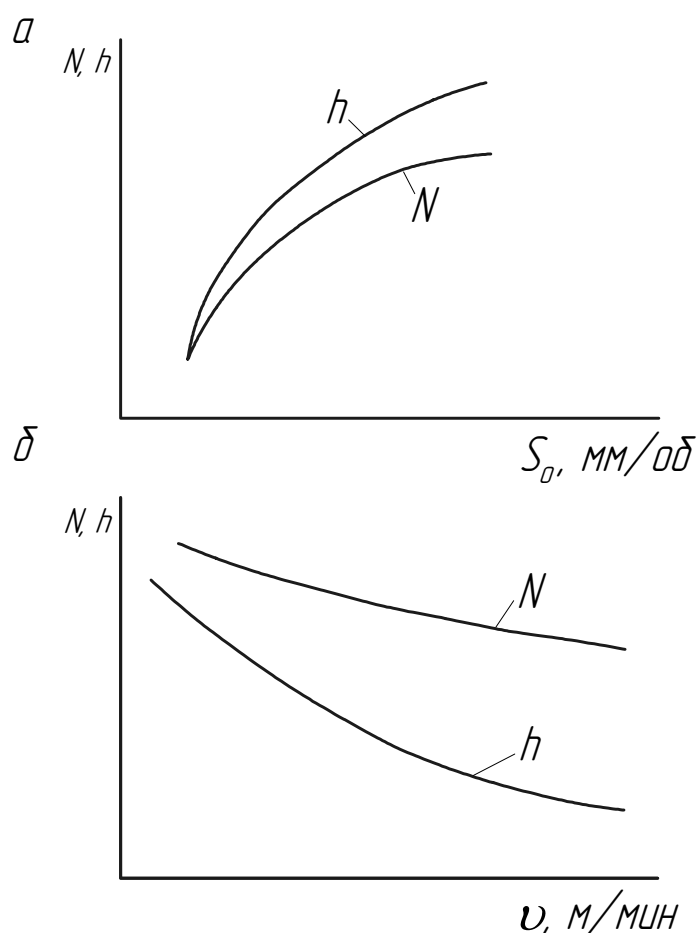


Рис. 20.4. Зависимости степени N и глубины h наклёпа от подачи (а) и скорости резания (б)

То же наблюдается при переходе от положительных значений передних углов лезвия к отрицательным. Это объясняется возрастанием усилий резания.

С увеличением *скорости резания* выделяется больше теплоты и уменьшается продолжительность силового воздействия на металл, это способствует разупрочнению поверхностного слоя и, следовательно, снижению степени наклёпа и микротвёрдости (рис. 20.4, б)

Значительное повышение наклёпа наблюдается при затуплении режущего инструмента, а также при встречном фрезеровании по сравнению с попутным.

При абразивной обработке в принципе сохраняются те же самые закономерности возникновения наклёпа, что и при работе лезвийным инструментом. Он возрастает с увеличением глубины и скорости шлифования, а также размера и радиуса округления абразивных зёрен.

Внутренние остаточные напряжения поверхностного слоя также зависят от вида обработки, режимов резания, свойств металла и других факторов.

Влияние режимов обработки и геометрии инструмента на остаточные напряжения определяются физико-механическими свойствами обрабатываемого металла. Например, при обработке пластичных материалов повышение скорости резания и подачи приводит к увеличению остаточных напряжений растяжения.

С уменьшением переднего угла γ лезвия инструмента остаточные напряжения сжатия возрастают. По мере затупления инструмента возрастают остаточные напряжения растяжения.

ЛЕКЦИЯ 21

Особенности абразивной обработки. Процесс шлифования. Геометрические параметры срезаемого слоя при шлифовании. Силы и мощность при шлифовании. Изнашивание и стойкость шлифовальных кругов. Тепловые явления при шлифовании. Основные направления совершенствования процесса шлифования

Особенности абразивной обработки. Процесс шлифования

Особенности абразивной обработки рассмотрим на примере шлифования.

Шлифование – это процесс обработки поверхностей детали, осуществляемый зёрнами абразивного, алмазного или эльборового материала.

Особенности процесса шлифования:

1) многопроходность, способствующая эффективному исправлению погрешностей формы и размеров детали;

2) резание осуществляется большим количеством беспорядочно расположенных абразивных зёрен. Эти зёрна, образующие прерывистый режущий контур, прорезают мельчайшие углубления, а объём металла, срезаемый в единицу времени, в этом случае значительно меньше, чем при резании лезвийным инструментом. Одним абразивным зерном в единицу времени срезается объём, примерно в 400 000 раз меньший, чем одним зубом фрезы;

3) абразивные зёрна расположены в теле круга хаотично, поэтому они могут иметь отрицательные значения передних углов и угол резания больше 90° . Абразивные зёрна в процессе резания можно разделить на режущие, давящие или скоблящие, если они врезаются на столь малую глубину, что происходит лишь пластическое выдавливание металла без снятия стружки, и не-режущие. В реальном процессе шлифования примерно 85...90 % всех зёрен не режет, а так или иначе пластически деформирует тончайший поверхностный слой, т. е. наклёпывает его.

4) 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);

5) большие скорости резания и неблагоприятная геометрия режущих зёрен способствует развитию в зоне резания высоких температур;

6) управлять процессом шлифования можно только за счёт изменения режимов резания, т. к. изменение геометрии абразивного зерна прак-

тически трудноосуществимо. Как исключение, алмазные круги с помощью специальной технологии изготовления могут иметь преимущественную (требуемую) ориентировку алмазных зёрен в теле круга, что обеспечивает благоприятные условия резания;

7) абразивный инструмент может в процессе резания самозатачиваться. Это происходит, когда режущие грани зёрен затупляются, что вызывает увеличение сил резания, а, следовательно, и сил, действующих на зерно. В результате, зёрна выпадают или вырываются из связки, раскалываются и в работу вступают новые острые зёрна;

8) шлифованная поверхность образуется в результате одновременного действия как геометрических факторов, характерных для процесса резания, так и пластических деформаций, сопровождающих этот процесс.

Геометрические параметры срезаемого слоя при шлифовании

При круглом шлифовании за один оборот заготовки шлифовальным кругом снимается слой металла с сечением $F = t \cdot S_{np}$. Работу круга характеризует среднее мгновенное сечение слоя, снимаемого в данный момент времени. Определим его величину.

Объём слоя металла, снимаемый за один оборот заготовки:

$$Q = \pi dt S_{np}.$$

Путь, пройденный кругом относительно детали за одну минуту, определим, как: $L = \pi D_k \cdot n_k$ (вращением детали пренебрегаем, т. к. $\frac{v_d}{v_k} \approx \frac{1}{100}$). Путь, пройденный периферийными точками круга за один

оборот детали: $l = \frac{\pi D_k n_k}{n_d} = \frac{L}{n_d}$. Среднее мгновенное сечение слоя f , снятого

всеми абразивными зёрнами, будет равно всему снятому объёму металла,

делённому на путь l , т. е. $f = \frac{Q}{l} = \frac{\pi dt s}{\frac{\pi D_k \cdot n_k}{n_d}} = \frac{\pi d n_d}{\pi D_k n_k} \cdot t \cdot s = \frac{v_d}{60 v_k} \cdot t \cdot S$.

С увеличением скорости вращения заготовки мгновенное сечение среза растёт, а, следовательно, возрастает и нагрузка на каждое зерно, круг изнашивается быстрее, а шероховатость поверхности увеличивается. Для получения менее шероховатой поверхности следует работать с возможно большей v_k , меньшей v_d и малыми t и S .

Силы и мощность при шлифовании

При шлифовании различают суммарную силу резания шлифовальным кругом и силу резания – царапания одним абразивным зерном. Рассмотрим только суммарную силу резания.

$$P = P_z + P_y + P_x;$$

$$P_z = C_{pz} \cdot v_d^{0,7} \cdot S_{пр}^{0,7} \cdot t^{0,6};$$

$$P_y = (1...3)P_z; P_x = (0,1...0,2)P_z.$$

Превышение составляющей силы P_y над P_z является следствием того, что удельные силы резания при шлифовании очень велики и в десятки раз превышают удельные силы резания при точении, сверлении и фрезеровании.

Мощность, необходимая для вращения круга:

$$N_{кр} = \frac{P_z \cdot v_k}{10^3 \cdot \eta_1}.$$

Мощность, затрачиваемая на изготовления детали:

$$N_d = \frac{P_z \cdot v_d}{60 \cdot 10^3 \cdot \eta_2},$$

где η_1 и η_2 – КПД механизмов вращения круга и детали.

Изнашивание и стойкость шлифовальных кругов

Общий износ рабочей части шлифовального круга состоит из износа в процессе шлифования и слоя удалённого при правке круга. В зависимости от свойств круга и условий шлифования, работа может проходить либо с затуплением абразивных зёрен, либо с самозатачиванием.

Процесс изнашивания рабочей поверхности круга можно разделить на два этапа. Первый этап (период приработки после правки) характеризуется откалыванием и выкрашиванием непрочного укреплённых зёрен. Второй этап – округлением (притуплением) и расщеплением абразивных зёрен.

Обычно круги работают с затуплением, а не с самозатачиванием. С самозатачиванием работают мелкозернистые круги, предназначенные для обработки твёрдых материалов. Если круг работает в режиме затупления абразивных зёрен, необходимо периодически проводить его правку.

Время работы круга между двумя его смежными правками при заданных режимах называется *периодом стойкости круга*:

$$T = \frac{C_T \cdot d^{0,6}}{v_d^{1,82} \cdot S^{1,82} \cdot t^{1,1}},$$

$$v_d = \frac{C_v \cdot d^y}{T^m \cdot t^x \cdot S^y}.$$

Тепловые явления при шлифовании

В связи с высокой температурой шлифования на поверхности детали могут образовываться прижоги, трещины и другие дефекты, снижающие эксплуатационные свойства деталей. Почти вся механическая мощность шлифования преобразуется в тепловую:

$$Q = Q_d + Q_{кр} + Q_c + Q_{oc} - \text{тепловой баланс шлифования}$$

Различают мгновенную температуру θ_m , развивающуюся в зоне микропореизания абразивным зерном; контактную θ_k , устанавливающуюся в зоне контакта круга с заготовкой; среднюю θ_{cp} , устанавливающуюся на всей обработанной поверхности. $\theta_k \leq \theta_m$ в связи с интенсивным отводом тепла из зоны шлифования в заготовку. $\theta_{cp} \leq \theta_k$ в связи с распространением теплоты по поверхности детали и ее снижением. Средняя температура влияет, в основном, на точность получаемой детали. При абразивном шлифовании $\theta_{cp} = 20 \dots 350 \text{ }^\circ\text{C}$, $\theta_k = 200 \dots 1100 \text{ }^\circ\text{C}$, θ_m изменяется от $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ до температуры плавления металла.

Существует несколько способов управления тепловым балансом: применение СОЖ, введение в абразивные массы активных наполнителей, пропитка инструмента спецрастворами. В качестве наполнителей применяют как металлы (алюминий, никель, медь и др.), так и неметаллы (асбест, алебастр, криолит, пирит).

Выбор режимов шлифования

При определении режима шлифования выбирают и рассчитываются:

- 1) характеристика шлифовального круга и окружная скорость v_k ;
- 2) поперечная подача (глубина резания t) и число проходов, которые обеспечивают снятие всего припуска;
- 3) продольная подача в долях ширины круга B : $S_{пр} = \kappa \cdot B$;
- 4) окружная скорость вращения детали v_d , исходя из $T = 25 \dots 60$ мин, ($v_d = 40 \dots 80$ м/мин);
- 5) СОЖ;
- 6) сила и мощность резания;
- 7) производится корректировка режима по паспорту станка;
- 8) машинное время.

Основные направления совершенствования процесса шлифования

К современным методам абразивной обработки относятся *скоростное, силовое и глубинное шлифование*. К *скоростному шлифованию* относят шлифование деталей со скоростью круга более 35 м/с и при удельном съеме материала до 5 мм³/с. В настоящее время известны исследования, в которых скорость шлифования доведена до 300 м/с.

При скоростном шлифовании каждое абразивное зерно за единицу времени успевает нанести большое количество царапин. В момент царапания снимается меньший объем металла и уменьшаются силы резания. Поэтому появляется возможность догрузки абразивного зерна круга и увеличения S_d , t , v_d . Быстро вращающийся круг обладает большей режущей способностью и большей стойкостью (на 15...20 %), т. к. зёрна круга нагружены более или менее равномерно. Установлено, что при повышении скорости резания с 35 м/с до 80 м/с машинное время шлифования снижается в 2...3 раза.

Силовое шлифование осуществляется на станках с мощностью привода до 100...250 кВт с прижимом круга до 1000 кг. Производительность силового шлифования сопоставима с производительностью лезвийной обработки.

При *глубинном шлифовании* весь припуск на обработку снимают за один проход круга. Например, при шлифовании методом врезания производительность резко возрастает с увеличением минутной поперечной подачи до 6 мм/мин (обычно 1,5...2 мм/мин).

Перспективными являются методы обработки абразивом, находящимся не в связанном состоянии, например, обработка *свободным абразивом*, а также *магнитно-абразивная* и *струйно-абразивная* обработка. При *обработке свободным абразивом* зерна помещают во вращающийся барабан, имеющий отверстие на цилиндрической поверхности. При вращении барабана абразивные зерна под действием центробежных сил попадают на периферию и вылетают из отверстия. Попадая на поверхности детали, абразивные зерна производят ее шлифование или полирование в зависимости от режима вращения барабана и размера зерен. При *струйно-абразивной обработке* абразивные зерна воздействуют на поверхность обрабатываемой детали в среде жидкости, например, воды. Преимущества обработки свободным абразивом состоят, прежде всего, в ее возможности обрабатывать сложные поверхности без жесткой связи с кинематикой процесса резания. Эти преимущества присущи и *магнитно-абразивной обработке*, при которой обрабатываемую деталь и порошок, обладающий ферромагнитными свойствами, помещают между полюсами электромагнита. Детали, порошок или полюсам магнита сообщают относительное движение.

ЛЕКЦИЯ 22

Особенности обработки материалов со специфическими свойствами в сопоставлении с обработкой углеродистых конструкционных сталей

Особенности обработки материалов со специфическими свойствами в сопоставлении с обработкой углеродистых конструкционных сталей

В предыдущих лекциях физические характеристики процесса резания иллюстрировались, в основном, на примере обработки углеродистых конструкционных сталей типа стали 45 или стали 40Х. Обработка материалов с другими физико-механическими свойствами, структурой и т. п., оказывающих существенное влияние на процесс резания, имеет некоторые особенности. Эти особенности проявляются, прежде всего, в характеристиках обрабатываемости, деформации стружкообразования, динамики, теплофизики, изнашивания и качества обработки. Рассмотрим изменения в характеристиках процесса резания таких материалов, как жаропрочные и нержавеющие стали и сплавы, титановые сплавы, чугуны, алюминиевые сплавы, медные сплавы, порошковые материалы и покрытия, высокопрочные композиционные полимерные материалы и пластмассы, углеграфитовые материалы по сравнению с углеродистой конструкционной сталью 45.

Особенности резания жаропрочных и нержавеющих сталей и сплавов

Существующие марки жаропрочных и нержавеющих сталей и сплавов подразделяют по следующим группам:

1) теплостойкие хромистые, хромоникелевые и хромомолибденовые стали перлитного, мартенситно-ферритного и мартенситного класса, (например, 34ХНЗМ, 20ХЗМВФ, 15Х5М), $K_0 = 1...2$ по отношению к стали 12Х18Н10Т;

2) коррозионностойкие хромистые и сложно легированные стали ферритного, мартенситно-ферритного и мартенситного классов, (например, 12Х13, 20Х13, 20Х17Н2), $K_0 = 0,6...1,5$;

3) коррозионностойкие, кислотостойкие, жаростойкие хромоникелевые стали аустенитного, аустенитно-ферритного и аустенитно-мартенситного классов (например, 12X18H10T, 12X21H5T, 07X16H6), $K_0 = 0,4 \dots 1,0$;

4) жаропрочные, жаростойкие, кислотостойкие хромоникелевые, хромоникелемаргонцовистые сложнолегированные стали аустенитного и аустенитно-ферритного классов (например, 10X11H20T3MP-0.45, 45X14H14B2M-0.8, 12X25H16Г7AP-0.6), $K_0 = 0,4 \dots 0,8$;

5) жаропрочные деформируемые сплавы на железоникелевой и никелевой основе (например, 36НХТЮ-0.32, ХН67ВМ7Ю-0.2, ХН60МВТЮ-0.15), $K_0 = 0,15 \dots 0,35$;

6) окалиностойкие и жаропрочные литейные сплавы на никелевой и хромовой основах (например, ЖС6-К-0.1, ВХ4-Л-0.2), $K_0 = 0,1 \dots 0,2$;

7) высокопрочные стали, $K_0 = 0,2 \dots 1,0$;

7.1) легированные (например, 28Х3СНМВФА-0.41, 33Х3СНМВФА-0.36, 43Х3СНМВФА-0.24);

7.2) дисперсионно-твердеющие стали (например, Н18К9М5Т-1).

Особенности резания:

1) низкая обрабатываемость в связи с их упрочняемостью и жаропрочностью ($K_0 = 0,1 \dots 1,0$);

2) пониженная виброустойчивость в связи с высокой упрочняемостью;

3) высокие температуры резания в связи с высокой теплопроводностью;

4) большие силы резания;

5) ускоренный износ и низкая стойкость инструмента в связи с высокой твердостью и прочностью материала и большими значениями напряжений и температуры в зоне резания, коэффициента трения, а также абразивной и адгезионной способностью.

Рекомендуемые режимы резания и геометрия инструмента при обработке стали 12X18H10T инструментом из ВК8 – $v = 2 \dots 2,5$ м/с, Р6М5 – $v = 0,4 \dots 0,6$ м/с; $\gamma = 16 \dots 20^\circ$, $\alpha = 6 \dots 8^\circ$, $f = 0,1 \dots 0,4$ мм; 36 НХТЮ – ВК8 – $v = 0,7 \dots 0,8$ м/с, Р9К5 $v = 0,1 \dots 0,2$ м/с; $\gamma = 5 \dots 10^\circ$, $\alpha = 10 \dots 15^\circ$, $f = 0,1 \dots 0,4$ мм.

Особенности обработки титановых сплавов

Сплавы на титановой основе относятся к VII группе высокопрочных сталей. Особенности их резания:

1) скорость резания в 2,5...5 раз меньше, чем при обработке стали 45;

- 2) малая пластичность и высокий коэффициент упрочнения приводят к образованию элементной стружки и отрицательной усадке;
- 3) возможно воспламенение стружки;
- 4) интенсивное наростообразование и задиры;
- 5) сила резания P_z на 20 % меньше, чем при обработке конструкционной стали 45 из-за пониженной пластичности;
- 6) высокая химическая активность титана приводит к окислению поверхности и росту напряжений и температуры резания;
- 7) высокое абразивное изнашивание инструмента, хрупкое разрушение и сколы;
- 8) низкая виброустойчивость процесса резания;
- 9) вредное воздействие титановой пыли.

Обрабатываемость чугунов

Чугуны подразделяются на: ферритные ($\Phi + \Gamma$); перлитные ($\Pi + \Gamma$); перлитные ковкие ($\Pi + \Gamma$); половинчатые ($\Pi + \Gamma + \Upsilon$), содержащие перлит, графит и цементит; белые ($\Pi + \Upsilon$). Обрабатываемость чугунов ухудшается по мере того, как углерод из свободного состояния (графит), переходит в связанное (цементит), с повышением истирающей способности.

Особенности резания:

- 1) образуется стружка надлома;
- 2) силы меньше, чем при обработке стали 45, т. к. чугуны малопластичны и склонны к упрочнению;
- 3) температура резания ниже, чем при обработке стали, однако скорость резания меньше;
- 4) повышение истирающей способности из-за отбеленного слоя.

Обрабатываемость алюминиевых сплавов

Алюминиевые сплавы с точки зрения обрабатываемости разделяют на три группы:

- 1) низкой твёрдости, имеющие склонность к налипанию (дюралюминий);
- 2) более высокой твёрдости, не налипающие на инструмент (термически упрочнённый дюралюминий, кованые сплавы АК6, АК8 и др.);
- 3) литые сплавы, содержащие кремний (силумины).

Особенности резания:

- 1) высокие скорость резания и подача, т. к. низкая твёрдость, лучше теплопроводность;
- 2) при обработке сплавов 1 и 2 групп образуется сливная стружка, 3 группы – элементная и надлома;
- 3) образование налипов и нароста в связи с повышенной адгезией алюминия к инструментальным материалам при более низких скоростях, чем при обработке стали;
- 4) силы резания уменьшаются в 2...4 раза, чем при обработке конструкционных сталей. Чем плотнее структура алюминия, тем выше силы;
- 5) расширение сплава при нагреве температурой резания, что снижает точность обработки;
- 6) одну и ту же шероховатость поверхности и стойкость инструмента при обработке алюминия и стали можно достичь в первом случае при более высоком уровне скорости резания;
- 7) требуется более тщательная заточка и доводка инструмента;
- 8) подача СОЖ в распыленном состоянии.

Особенности обработки медных сплавов

С точки зрения обрабатываемости медные сплавы подразделяют на три группы: 1) сплавы с гомогенной (однородной) структурой (латуни Л60, Л63, бронзы Бр 04 ЦЗ, БрКМ 1-3, БрА 7 и др., медь); 2) с гетерогенной (неоднородной) структурой (ЛМЦ 52-2, ЛЦ 16К4 и др.); 3) сплавы, содержащие свинец (ЛС 63-3, ЛЦ 40С и др.).

Особенности резания:

- 1) при обработке медных сплавов коэффициент обрабатываемости в 2 – 3 раза выше, чем при обработке чугунов и сталей;
- 2) образуется сливная, вязкая и трудноломающаяся стружка при обработке первой группы сплавов и меди. При обработке второй группы сплавов – сливная стружка, но легче ломается. При обработке третьей группы образуется стружка надлома в виде пыли;
- 3) отсутствует нарост;
- 4) силы резания при точении гомогенных сплавов и меди выше, а для гетерогенных – ниже, чем при обработке сталей;
- 5) шероховатость поверхности не зависит от v , т. к. нарост, температура, стружкообразование влияет меньше, чем подача и геометрия инструмента.

Особенности обработки порошковых материалов и покрытий

К материалам, полученным методами порошковой металлургии, относятся:

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 твёрдых смазочных материалов (графит, сульфиды), либо повышенной износостойкости и с низкими значениями коэффициента трения (тугоплавкие карбиды, оксиды, частицы асбеста и др.);

3) материалы электротехнического назначения с большим разнообразием составов;

4) материалы для фильтров на основе порошков железа, бронзы, никеля, алюминия, нержавеющей стали, тугоплавких соединений;

5) композиционные.

Специфика материалов: сложный химический состав; большое количество составляющих микроструктуры; остаточная пористость, снижение теплопроводности по сравнению с монолитными на 20 %; низкая прочность и малое временное сопротивление.

Особенности обработки:

1) сливная стружка, но хрупкая и легко разделяющаяся на элементы;

2) силы резания материалов с пористостью больше 10 % меньше, чем при обработке монолитных сталей, а при малой пористости – больше, так как снижаются растягивающие напряжения;

3) температура резания выше, чем монолитных, так как теплоотвод хуже;

4) характер износа инструмента аналогичен, однако больше вероятность микро- и макроразрушений лезвия из-за соударения с краями пор.

В качестве *покрытий* используют: алюминий, вольфрам, медь и др., никель, хромборкремниевые самофлюсующиеся сплавы типа ПГ-ср, СНГН и др. и их подразделяют на подвергаемые и неподвергаемые оплавлению. Для первой группы характерна структура с минимальной пористостью, для второй группы – их слоистость и пористость. Напыленный материал по сравнению с исходным обладает большей хрупкостью и твердостью.

Особенности обработки:

- 1) стружка надлома или элементная;
 - 2) сосредоточение нагрузки на режущей кромке и износ у вершины резца;
 - 3) высокая температура резания из-за пониженной теплопроводности покрытия;
 - 4) преобладание абразивного износа;
 - 5) низкое качество обработки из-за пористой структуры.
- Применяется как лезвийная, так и абразивная обработка.

Особенности обработки композиционных полимерных материалов и пластмасс

По обрабатываемости волокнистые композиционные полимерные материалы (ВКПМ) делят на: 1) пластмассы с волокнистым наполнителем; 2) стеклопластики; 3) органопластики; 4) боропластики; 5) углепластики; 6) гибридные материалы. Пластмассы подразделяют на:

- 1) термопластичные без наполнителя и с металлическим наполнителем;
- 2) термореактивные с газовоздушным, порошкообразным, волокнистым, слоистым наполнителями.

Особенности обработки:

- 1) высокая скорость резания в связи с низкой теплопроводностью, характеризуемая следующим поступлением тепла в инструмент – $Q_u = 90\%$, в стружку – $Q_c = 5\%$, в заготовку – $Q_d = 5\%$;
- 2) необходимо учитывать направление армирования материала (резание вдоль или поперек волокон);
- 3) образуется мелкодисперсная стружка и другой процесс стружкообразования из-за анизотропии материала;
- 4) большие площадки контакта из-за упругости ВКПМ, а значит большие силы резания на задней поверхности. Результирующая сила резания в 10...20 раз выше, чем при обработке металлов;
- 5) уровень температуры ниже, т. к. теплостойкость материала всего 160...300 °С;
- 6) высокая твердость, соизмеримая с твердостью СТМ, что затрудняет выбор инструментального материала;

7) преобладание абразивного износа, а также механохимического адсорбционного износа в связи с разрушением структуры полимерного связующего при резании. Величина износа определяется по технологическим критериям (качеству поверхности);

8) сложность получения высококачественной поверхности, требующая применения острозаточенного инструмента;

9) в ряде случаев не допускается применение СОЖ;

10) высокая виброустойчивость процесса резания.

Особенности обработки углеграфитовых материалов

Углеграфитовые материалы по обрабатываемости подразделяются на «мягкие» типа ГМЗ, ППГ и др. и «твердые» (силицированные) типа СГ.

Особенности обработки:

1) стружка – пылеобразная;

2) сила и температура резания невелики;

3) в основном абразивно-механическое изнашивание инструмента;

4) применяют как лезвийные, так и абразивные инструменты. Для мягких – деревообрабатывающий инструмент, для СГ – в основном алмазные инструменты и электрохимическую обработку.

ЛЕКЦИЯ 23

Обработка резанием как система. Взаимосвязь явлений при обработке резанием

Обработка резанием как система

Целью обработки материалов резанием является получение на заготовке новых поверхностей с заданными характеристиками их качества. Этот результат достигается путем упругой и пластической деформации срезаемого слоя и обрабатываемой поверхности и сопровождается изнашиванием контактных площадок режущего инструмента. Эти процессы совершаются одновременно, тесно связаны между собой 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 некоторого множества элементов, имеющих между собой реальные связи. Элементы системы могут иметь любую природу, в частности являться процессами. Состояние системы в каждый момент времени характеризуется набором значений ряда переменных, а поведение системы – определенной последовательностью ее состояний во времени. Система обладает свойством *относительной устойчивости*, т. е. она сохраняется только в определенных границах изменения ее переменных.

Системе присуще *свойство внутренней целостности*, которое характеризуется ее автономностью, т. е. относительной самостоятельностью поведения и существования. Вследствие своей относительной автономности любая система может рассматриваться как подсистема или элемент более широкой системы. Одновременно явления или объекты, рассматриваемые в рамках данной системы как нерасчлененные целые, при их изолированном изучении могут рассматриваться как системы иного уровня. Материальные системы характеризуются разной степенью активности взаимодействия их частей между собой. В любой системе возможны как взаимозависимость подсистем между собой, так и независимость их друг относительно друга. Изучение систем осуществляется путем целенаправленного изменения внешних воздействий на ее «входе» и изучения реакций на «выходе».

К входным параметрам системы резания относятся: станок (С), приспособление (П), инструмент (И), деталь (Д) или сокращенно СПИД, а также технологическая среда и режим резания, к выходным: точность об-

работки, качество поверхности, стойкость инструмента, прочность инструмента, производительность, экономичность. Кроме перечисленных, возможны и другие входные и выходные параметры.

Структурную схему обработки резанием можно представить в представленном на рис. 23.1 виде, где M – материал, P – размер, Δ – припуск, $F_{пр}$ и $F_{рв}$ – функции, связывающие первичные параметры с процессом резания и процесс резания со вторичными параметрами. Рассмотрим механизм функционирования системы резания более подробно.

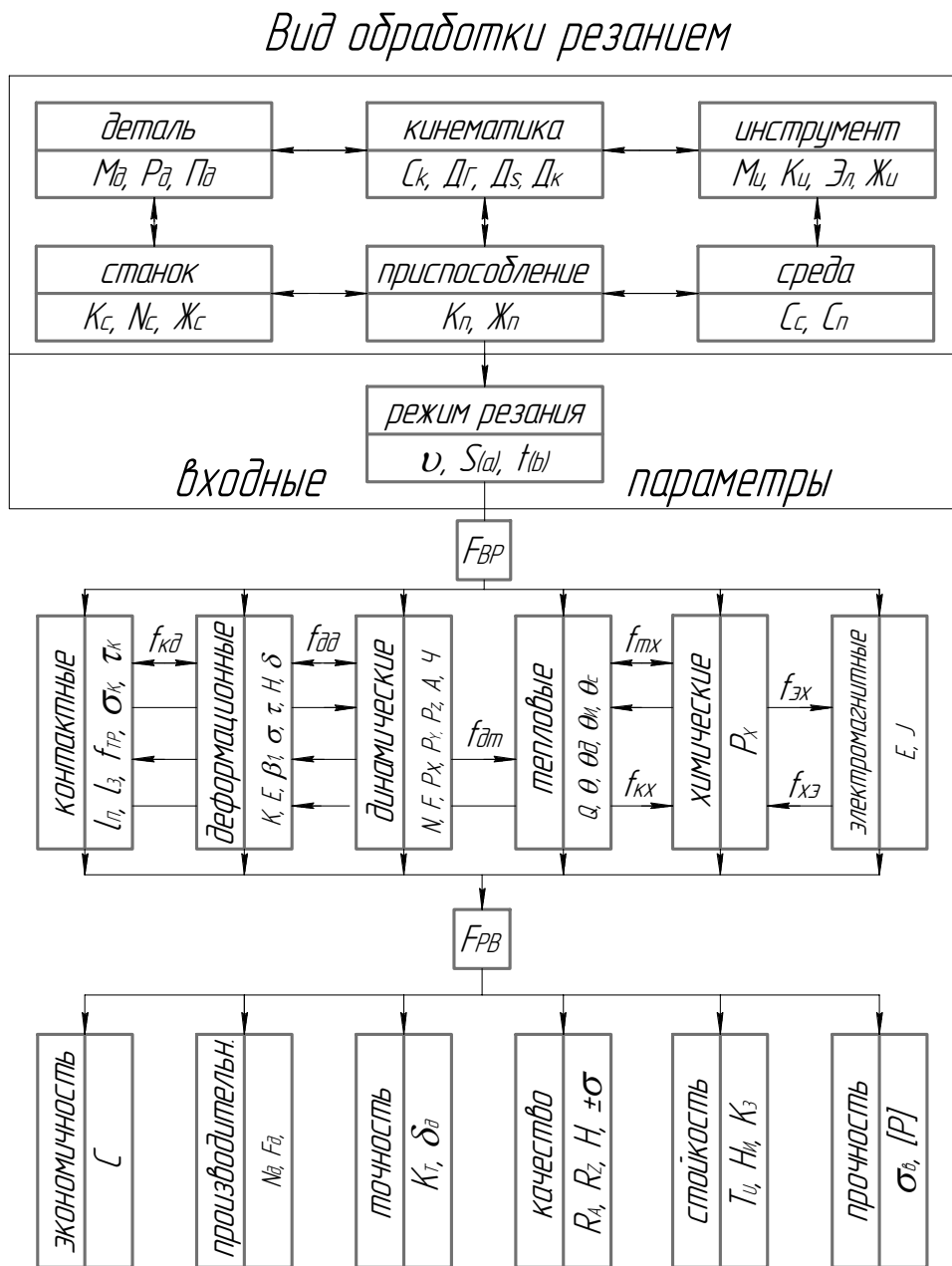


Рис. 23.1. Структурная схема системы резания

Система резания представляет собой необходимую для обработки данной заготовки *регулируемую совокупность* станка, инструментов, приспособлений, технологической среды с одной стороны, и процесс резания – с другой. *Процесс резания* можно рассматривать как механизм системы регулирования, связывающий систему СПИД и получающиеся в результате обработки технологические параметры детали.

Связи между элементами процесса резания характеризуются их типом и физической сущностью. *По типу* они делятся на однонаправленные и двухсторонние, когда оба элемента взаимно влияют друг на друга. В этом случае прямое воздействие первого элемента на второй вызывает его обратное воздействие, которое может ослабить прямое или резко усилить его. Связи между элементами структурной схемы могут быть *непосредственными* или *косвенными*, действующими посредством изменения ряда других закономерностей, связывающих два рассматриваемых параметра. Например, непосредственное влияние предварительного нагрева материала детали на стойкость инструмента связано со снижением механических характеристик этого материала. При этом нагретый срезаемый слой изменяет характер распределения температур в зоне стружкообразования, и, как следствие, изменяются закономерности трения, наростообразования и т. д.

Процесс резания представляет собой сложный комплекс физико-химических явлений. Условия протекания процесса резания определяются кинематической схемой резания, упругими и пластическими деформациями обрабатываемого материала, его разрушением в зоне резания, трением, тепловыми явлениями, химическими, электрическими и магнитными явлениями, а также другими факторами. В соответствии с этим систему резания можно разделить на ряд частных подсистем: механическую, тепловую и т. п. Следует отметить, что все подсистемы являются замкнутыми системами, в которых выход последнего элемента связан с входом в первый. Закономерности функционирования таких систем рассматривает *теория автоматического регулирования*.

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, то система называется одноконтурной, а если несколько – многоконтурной.

Обработка резанием относится к объектам многоконтурного регулирования, поскольку имеет большое число регулируемых величин (рис. 23.2), изменение каждой из которых вызывает изменение других параметров. Однако для изучения свойств отдельных элементов, прежде всего, процесса резания, систему условно можно считать разомкнутой, так как управляющее воздействие на процесс резания и вторичные параметры наступает только со стороны первичных параметров.

Объектом регулирования по этой схеме являются все первичные параметры и, в первую очередь, в качестве регулятора используют изменение режимов резания ($P_{ж}$). Регулирование процесса обработки в этом случае заключается в том, чтобы, исходя из знания параметров детали, вида обработки и технологической среды путем изменения режима резания получить необходимые параметры функционирования системы. Взаимодействие регулятора с элементами системы осуществляется путем обратных связей 1 – 7, например, подача S определяет свойства динамической системы (связь 1), которые в свою очередь зависят от конструкции приспособления Π и инструмента I (связь 6 и 5). Скорость резания v определяет главным образом тепловые явления (связь 2), а кинематика процесса резания влияет на пластические деформации и трение (связь 3) и точность обработки $T_{ч}$ (связь 7). В качестве регулятора при этом чаще всего используется подача S (связь 4). В конечном итоге регулирование свойств подсистем и процесса резания определяет выходные параметры – точность $T_{ч}$, качество поверхности $K_{п}$, стойкость $C_{и}$ и прочность $\Pi_{и}$ инструмента, производительность $\Pi_{р}$ и экономичность $\mathcal{E}_{к}$ обработки.

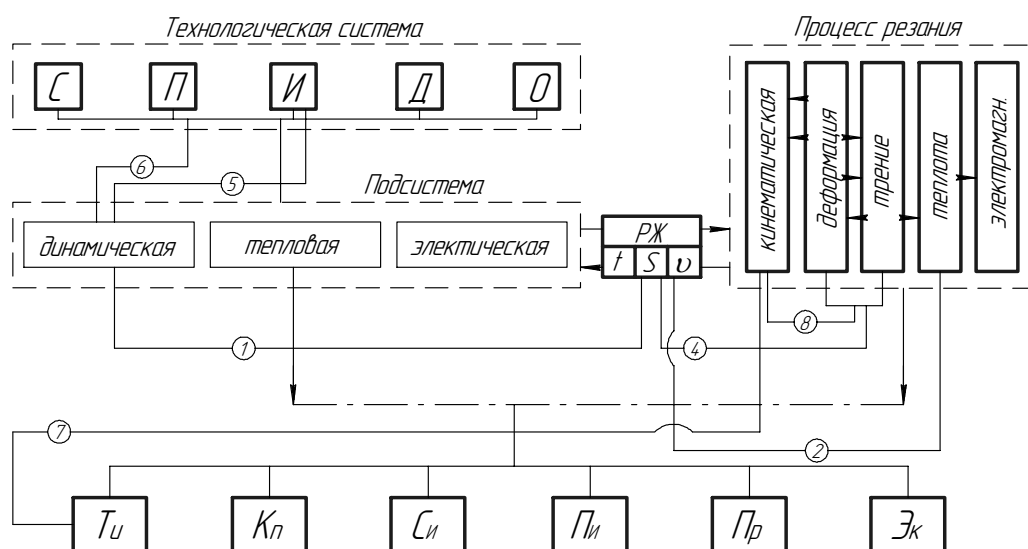


Рис. 23.2. Структурная схема автоматического регулирования системы резания

Взаимосвязь явлений при обработке резанием

Взаимосвязь физических явлений в процессе резания можно наглядно проследить при сопоставлении выходных характеристик системы резания. Из многообразия выходных характеристик выберем отдельные, которые дают представление об основных элементах системы резания и по которым в литературе имеется достаточное количество данных. Это, прежде всего, коэффициенты утолщения или укорочения стружки $K_{a,1}$, составляющая силы резания P_z и температура резания θ , характеризующие деформационные и тепловые процессы в зоне резания, стойкость инструмента T , свидетельствующая о состоянии инструмента, шероховатость поверхности детали $R_{z,a}$, характеризующая качество обработки. Из параметров, оказывающих наиболее сильное влияние на выходные характеристики, выбираем элементы режима резания – v , S и t , геометрические параметры инструмента – γ , α , φ , φ_1 , λ , r_b , а также физико-механические свойства обрабатываемой заготовки и применение СОЖ.

1. Влияние скорости резания v (рис. 23.3, а):

1.1. На коэффициент утолщения или укорочения стружки $K_{a,1}$.

При резании материалов, не склонных к наростообразованию, при увеличении скорости резания $K_{a,1}$ вначале быстро, а затем более медленно уменьшается. Такое влияние v на K_a объясняется уменьшением коэффициента трения между стружкой и передней поверхностью при росте температуры резания вследствие возрастания v .

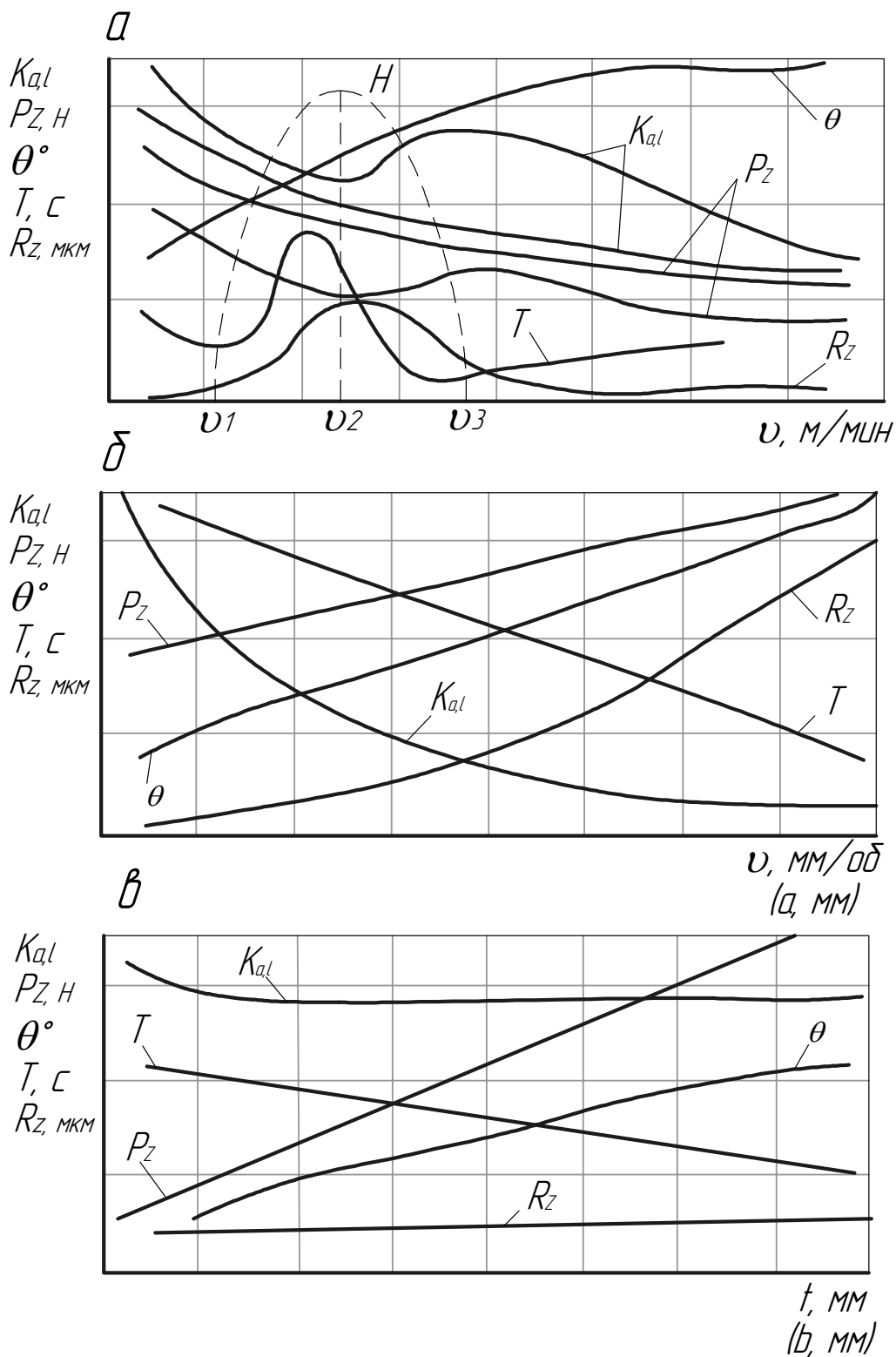


Рис. 23.3. Влияние на коэффициент утолщения или укорочения стружки $K_{a,1}$, составляющую силы резания P_z , температуру резания θ , стойкость инструмента T и шероховатость обработанной поверхности $R_{z,a}$ скорости резания v (а), подачи S (толщины стружки a) (б), глубины резания t (ширины среза b) (в)

При резании материалов, склонных к наростообразованию, v влияет на $K_{a,1}$ не монотонно. Вначале при росте скорости резания до v_2 $K_{a,1}$ уменьшается, а затем вновь растет и при достижении некоторого значения v_3 рост $K_{a,1}$ прекращается и при скоростях резания больших v_3 значения $K_{a,1}$ вновь уменьшаются. Уменьшение коэффициента $K_{a,1}$ при увеличении скорости резания от v_1 до v_2 и его дальнейшее увеличение при возрастании от v_2 до v_3 связано с действием на процесс стружкообразования нароста. Возрастание скорости резания от v_1 до v_2 сопровождается ростом высоты нароста H и увеличением переднего угла инструмента, вследствие чего степень деформации срезаемого слоя уменьшается. При возрастании скорости резания от v_2 до v_3 высота нароста уменьшается так же, как и величина фактического переднего угла, стремящегося к величине переднего угла заточки. Это вызывает увеличение коэффициента утолщения стружки. При скоростях резания больших v_3 нарост отсутствует, и скорость резания влияет на коэффициент $K_{a,1}$ только через изменение коэффициента трения.

1.2. На составляющую силы резания P_z .

Изменение скорости резания влияет на составляющие силы резания так, как она влияет на изменение коэффициента утолщения или укорочения стружки. При резании материалов, не склонных к наростообразованию, при увеличении скорости резания P_z вначале быстро, затем более медленно уменьшается за счет изменения коэффициента трения. При резании материалов, склонных к наростообразованию, зависимость P_z от v не монотонна вследствие влияния нароста, приводящего к изменению действительного переднего угла. При скоростях, больших v_3 составляющая P_z уменьшается вследствие уменьшения коэффициента трения и увеличения температуры резания.

1.3. На температуру резания θ .

С увеличением скорости резания возрастает количество тепла, выделяющегося в зоне резания ($Q = P_z \cdot v$), а также температура нагрева детали, стружки и инструмента. Однако рост температуры отстает от роста скорости резания, т. к. уменьшается P_z и растет отвод тепла стружкой.

1.4. На стойкость инструмента T .

Связь между скоростью резания и периодом стойкости выражается при обработке чугуна убывающей кривой, напоминающей гиперболу. При обработке сталей зависимость T от v изображается более сложной кривой, имеющей несколько перегибов ($\max T$ при $v = 10 \dots 40$ м/мин). Физические причины уменьшения, а затем увеличения T полностью не выяснены. Имеется предположение, что это связано с изменением относительного износа

инструмента. При скоростях, на которых относительный износ не изменяется, происходит уменьшение T . При скоростях, соответствующих уменьшению относительного износа, T возрастает. Резкое увеличение относительного износа при больших v вызывает резкое падение T .

1.5. На шероховатость обработанной поверхности $R_{z,a}$.

При обработке материала, не склонного к наростообразованию, при увеличении v высота неровностей непрерывно уменьшается. Это связано с уменьшением объема пластической деформации и среднего коэффициента трения. Влияние v в этом случае не особенно сильное. При обработке материала, склонного к наростообразованию, зависимость $R_{z,a}$ от v имеет горбообразный характер. Максимальная высота неровностей соответствует максимальной высоте нароста.

При увеличении v абсолютная величина остаточных напряжений σ возрастает, но глубина их залегания Δ уменьшается; v влияет на наклеп так же, как и на $K_{a,1}$.

2. Влияние подачи S (рис. 23.3, б):

2.1. На коэффициент утолщения или укорочения стружки $K_{a,1}$.

Чем больше толщина a (S) срезаемого слоя металла, тем меньше коэффициент $K_{a,1}$, что связано с изменением угла β_1 . Известно, что чем больше угол β_1 , тем меньше коэффициент утолщения или укорочения стружки.

2.2. На составляющую силы резания P_z .

С увеличением a (S) нагрузка на единицу длины режущего лезвия возрастает, возрастает температура, что приводит к уменьшению сил трения, усадки стружки и снижению сопротивления обрабатываемого материала пластическому деформированию. Подача влияет на P_z меньше, чем глубина резания, т. к. увеличение толщины среза уменьшает степень деформации ($K_{a,1}$) и рост силы отстает от роста толщины срезаемого слоя.

2.3. На температуру резания θ .

С увеличением a (S) увеличивается P_z примерно в степени 0,75, а следовательно, возрастает работа резания и количество выделяемого тепла. Одновременно растет площадь контакта стружки с передней поверхностью резца. Это улучшает условия отвода тепла, поэтому увеличение температуры отстает от роста толщины среза.

2.4. На стойкость инструмента T .

С увеличением S (a) стойкость инструмента снижается, т. к. увеличивается силовая и тепловая нагрузки на лезвие инструмента. Причем увеличение a больше, чем b влияет на снижение стойкости инструмента.

2.5. На шероховатость обработанной поверхности $R_{z,a}$.

С увеличением S высота неровностей возрастает, и интенсивность влияния подачи на R_z зависит от величины подачи. Например, если подача при точении меньше 0,5 мм/об, то ее влияние на высоту неровностей заметно ослабевает ($R_{z,a} = S \frac{\sin \varphi \cdot \sin \varphi_1}{\sin(\varphi + \varphi_1)}$).

3. Влияние глубины резания t (рис. 23.3, в):

3.1. На коэффициент утолщения или укорочения стружки $K_{a,1}$.

Влияние глубины резания на $K_{a,1}$ незначительно, т. к. уширение стружки при резании составляет 5...15 % от ширины срезаемого слоя. При малой глубине резания t в силу соизмеримости ширины срезаемого слоя b с радиусом округления режущей кромки влияние t на $K_{a,1}$ более заметно.

3.2. На составляющую силы резания P_z .

С увеличением t (b) сила P_z пропорционально возрастает, т. к. возрастает нагрузка на режущее лезвие, причем влияние b на P_z больше, чем a .

3.3. На температуру резания θ .

С увеличением t (b) прямопропорционально растет сила, работа резания и количество выделяющейся теплоты. Во столько же раз увеличивается и длина активной части режущего лезвия, а соответственно отвод тепла. Поэтому с увеличением b температура резания изменяется незначительно ($x_\theta \approx 0,1$).

3.4. На стойкость инструмента T .

При увеличении t (b) наряду с возрастанием количества выделяемой теплоты активная часть режущего лезвия становится длинней и усиливается отвод теплоты. В последнем случае тепловая нагрузка на единицу длины режущего лезвия будет меньше, и следовательно, ниже температура резания. Поэтому увеличение ширины среза в меньшей степени сказывается на повышении интенсивности изнашивания инструмента и его стойкости, чем увеличение толщины среза.

3.5. На шероховатость обработанной поверхности $R_{z,a}$.

Глубина резания t на высоту неровностей $R_{z,a}$ значительного влияния не оказывает.

4. Влияние переднего угла γ (рис. 23.4, а):

4.1. На коэффициент утолщения или укорочения стружки $K_{a,1}$.

При увеличении переднего угла γ коэффициент усадки $K_{a,1}$ уменьшается, т. к. уменьшается трение стружки о переднюю поверхность инструмента, что в свою очередь приводит к увеличению угла скалывания β_1 . Известно, что чем больше угол β_1 , тем меньше коэффициент утолщения или укорочения стружки.

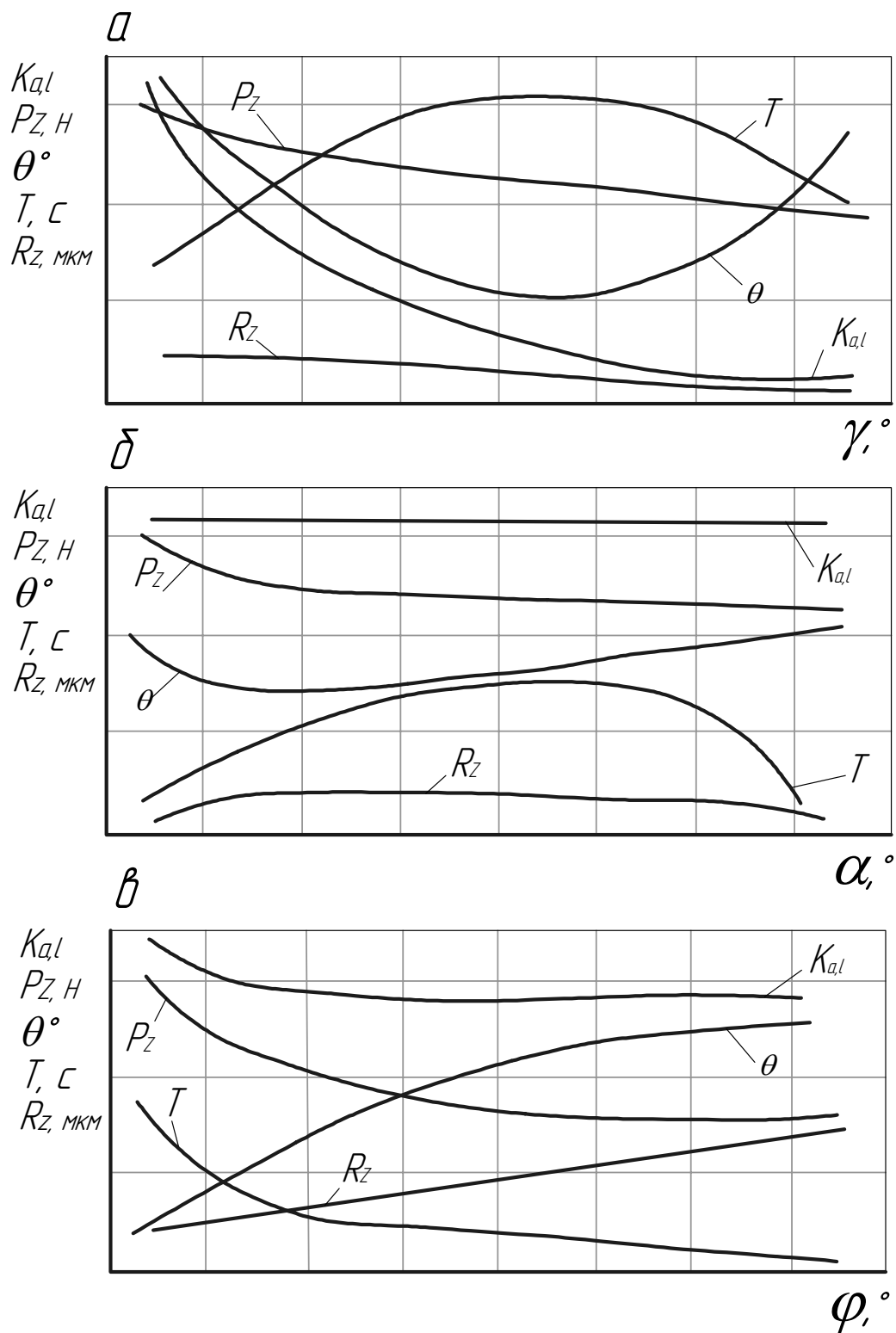


Рис. 23.4. Влияние на те же характеристики по рис. 23.3 переднего угла γ (а), заднего угла α (б), главного угла в плане φ (в)

4.2. На составляющую силы резания P_z .

При увеличении γ облегчается врезание лезвия в заготовку, улучшается сход стружки, уменьшается деформация обрабатываемого металла и снижается коэффициент утолщения или укорочения стружки, а следовательно, уменьшается составляющая силы резания P_z .

4.3. На температуру резания θ .

С увеличением γ уменьшается сила, а следовательно, работа резания, а также количество выделяющегося тепла. Однако при этом ухудшаются условия отвода тепла, т. к. уменьшается величина угла заострения β , т. е. массивность лезвия резца. Поэтому существует некоторое оптимальное значение угла β , при котором уменьшаются силы резания и количество выделившегося тепла. С увеличением γ выше оптимального значения уменьшается массивность лезвия, ухудшаются условия отвода тепла, растет температура резания.

4.4. На стойкость инструмента T .

Чем больше передний угол γ , тем легче протекает процесс резания, т. е. тем меньше силы и температура резания, деформация срезаемого слоя, а следовательно, выше стойкость режущего инструмента. Однако следует учитывать, что с увеличением γ уменьшается угол заострения β , ухудшается отвод тепла, снижается прочность лезвия и, в конечном итоге, стойкость инструмента.

С увеличением предела прочности и твердости обрабатываемого материала и уменьшением прочности инструментального материала значения оптимального переднего угла уменьшаются.

4.5. На шероховатость обработанной поверхности $R_{z,a}$.

Угол γ на высоту неровностей значительного влияния не оказывает.

5. Влияние заднего угла α (см. рис. 23.4, б):

5.1. На коэффициент утолщения или укорочения стружки $K_{a,1}$.

Задний угол на $K_{a,1}$ почти не влияет.

5.2. На составляющую силы резания P_z .

С увеличением α уменьшается контакт задней поверхности инструмента с поверхностью заготовки, что приводит к уменьшению сил трения и резания. Интенсивность влияния α на P_z невелика, например, с увеличением α от 2 до 10° P_z уменьшается всего на 6 %, при дальнейшем увеличении α сила резания остается почти неизменной.

5.3. На температуру резания θ .

При малых углах α ($\alpha < 5^\circ$) трение задней поверхности о заготовку и давление с ее стороны велико, что приводит к росту выделения тепла и повышению температуры резания. При увеличении α теплоотвод улучшается, но при определенных значениях α в силу уменьшения β теплоотвод в тело инструмента ухудшается, и температура резания повышается. Влияние α по сравнению с γ незначительно.

5.4. На стойкость инструмента T .

С увеличением заднего угла до определенных пределов (в зависимости от обрабатываемого материала) условия резания улучшаются и T растет. Однако увеличение α приводит к уменьшению угла заострения β , в результате чего ухудшаются условия теплоотвода и стойкость падает.

5.5. На шероховатость обработанной поверхности $R_{z,a}$.

Задний угол не оказывает значительного влияния на $R_{z,a}$. При малых α возможно снижение $R_{z,a}$ за счет пластического деформирования неровностей, а при больших – некоторое снижение $R_{z,a}$ за счет роста температуры резания и уменьшения составляющей силы резания P_z .

6. Влияние угла в плане φ (см. рис. 23.4, в):

6.1. На коэффициент утолщения или укорочения стружки $K_{a,1}$.

С увеличением угла φ несколько улучшаются условия резания, снижаются нагрузки, увеличивается температура резания, что приводит к некоторому снижению коэффициента $K_{a,1}$.

6.2. На составляющую силы резания P_z .

С увеличением угла в плане уменьшается нагрузка на инструмент, т. к. при постоянной площади среза с увеличением угла в плане φ увеличивается толщина среза a и соответственно уменьшается удельная сила резания. Сила резания растет заметно при $\varphi < 30^\circ$.

6.3. На температуру резания θ .

С увеличением угла в плане уменьшается угол при вершине инструмента, что приводит к уменьшению массы лезвия и ухудшению теплоотвода. Вследствие этого возрастает температура резания.

6.4. На стойкость инструмента T .

С увеличением угла φ уменьшается ширина среза b и величина угла ε и ухудшается теплоотвод в тело инструмента, что снижает его стойкость.

6.5. На шероховатость обработанной поверхности $R_{z,a}$.

С увеличением φ высота неровностей возрастает, т. к. главная режущая кромка участвует в формировании гребешков неровностей (см. формулы (20.3) и (20.4)).

7. Влияние вспомогательного угла в плане φ_1 (рис. 23.5, а).

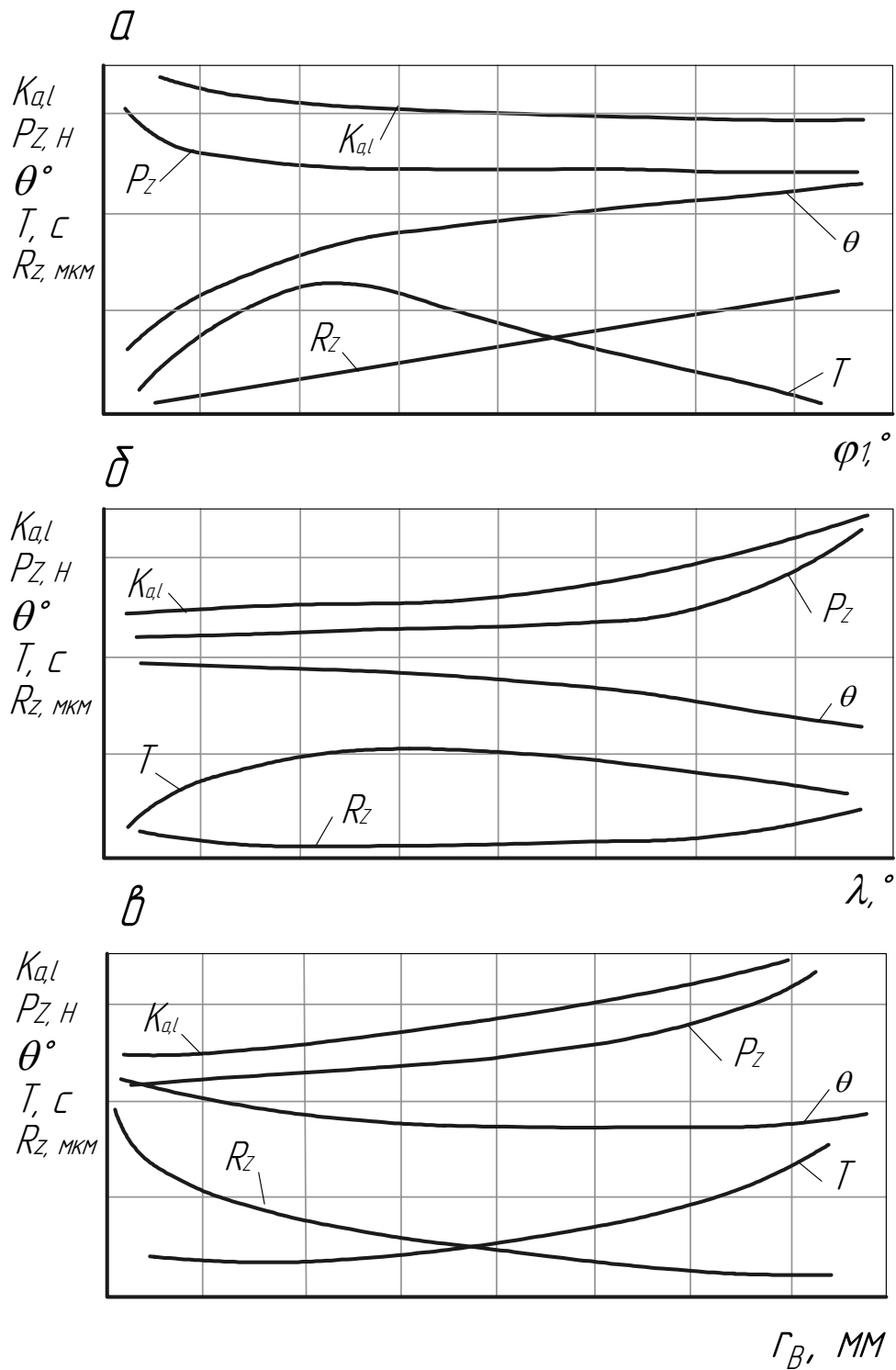


Рис. 23.5. Влияние на те же характеристики по рис. 23.3 вспомогательного угла в плане φ_1 (а), угла наклона режущей кромки λ (б), радиуса округления режущей кромки Γ_B (в)

7.1. На коэффициент утолщения или укорочения стружки $K_{a,1}$.

С увеличением вспомогательного угла в плане φ_1 , уменьшаются нагрузки на инструмент, температура резания возрастает, что облегчает процесс деформирования и несколько снижает $K_{a,1}$.

7.2. На составляющую силы резания P_z .

С увеличением φ_1 , уменьшается фактическая площадь среза и тем самым уменьшается нагрузка на инструмент. Малые углы φ_1 в большей степени влияют на P_z .

7.3. На температуру резания θ .

С увеличением φ_1 уменьшается ε , что приводит к уменьшению массы лезвия и ухудшению теплоотвода. Вследствие этого возрастает температура резания.

7.4. На стойкость инструмента T .

С увеличением φ_1 уменьшается трение вспомогательной поверхности о заготовку, что увеличивает T , однако при дальнейшем увеличении φ_1 уменьшается угол при вершине ε и ухудшается теплоотвод и прочность вершины, что снижает стойкость инструмента.

7.5. На шероховатость обработанной поверхности $R_{z,a}$.

Угол φ_1 очень сильно влияет на шероховатость обработанной поверхности, т. к. вспомогательная режущая кромка формирует обработанную поверхность (см. формулы (20.3) и (20.4)).

8. Влияние угла наклона режущей кромки λ (см. рис. 23.5, б):

8.1. На коэффициент утолщения или укорочения стружки $K_{a,1}$.

Угол λ влияет на угол схода стружки. Он изменяет положение передней поверхности, увеличивает рабочую длину главного лезвия и в зависимости от знака угла λ увеличивает или уменьшает коэффициент $K_{a,1}$. С увеличением λ от -45° до $+45^\circ$ $K_{a,1}$ возрастает. При $\lambda > 45^\circ$ $K_{a,1}$ уменьшается.

8.2. На составляющую силы резания P_z .

На главную составляющую силы резания изменение угла λ влияет сравнительно мало: увеличение $-\lambda$ практически не изменяет P_z ; при увеличении $+\lambda$ сила P_z несколько возрастает, если $\lambda > 30^\circ$.

8.3. На температуру резания θ .

Увеличение угла λ увеличивает массу лезвия резца возле его вершины и улучшает теплоотвод, что снижает температуру резания.

8.4. На стойкость инструмента T .

С увеличением λ и переходе от отрицательных значений к положительным стойкость возрастает и достигает \max при некотором оптималь-

ном значении. Для одинаковой величины T период стойкости резца при положительном знаке больше, чем при отрицательном. Объясняется это удалением первоначальной точки контакта от вершины инструмента и уменьшением ее величины.

8.5. На шероховатость обработанной поверхности $R_{z,a}$.

При увеличении положительного значения λ стружка будет сходиться в сторону обработанной поверхности детали и царапать ее, ухудшаются условия деформирования срезаемого слоя, что повышает несколько высоту неровностей.

9. Влияние радиуса округления режущей кромки r_b (см. рис. 23.5, в):

9.1. На коэффициент утолщения или укорочения стружки $K_{a,1}$.

Увеличение r_b ухудшает условия деформирования металла и увеличивает $K_{a,1}$.

9.2. На составляющую силы резания P_z .

Радиус округления режущей кромки r_b при достаточно больших размерах его способствует повышению P_z (до 15 %), т. к. ухудшаются условия резания, увеличивается деформация.

9.3. На температуру резания θ .

Увеличение радиуса округления режущей кромки увеличивает площадь контакта инструмента с заготовкой, улучшает теплоотвод и несколько снижает температуру резания. При больших r_b резко увеличивается P_z и растет температура.

9.4. На стойкость инструмента T .

С увеличением r_b происходит упрочнение режущей кромки, улучшается теплоотвод и возрастает стойкость инструмента.

9.5. На шероховатость обработанной поверхности $R_{z,a}$.

С увеличением r_b высота неровностей уменьшается, т. к. происходит их скругление.

ЛЕКЦИЯ 24

Резание с применением смазочно-охлаждающих средств. Смазочно-охлаждающие жидкости и способы их подачи в зону резания

Резание с применением смазочно-охлаждающих средств

Интенсификация процессов металлообработки потребовала применения специальных средств для отвода из зоны резания теплоты, стружки и мелких частиц, образующихся при резании, а также снижения сил трения. К смазочно-охлаждающим средствам (СОС) относятся смазочно-охлаждающие вещества (жидкие и твердые), газовые средства и устройства для их подготовки и транспортирования к зоне резания и обратно. Эти средства должны охлаждать зону резания, обладать смазывающей и моющей способностью, препятствовать диффузионному и адгезионному изнашиванию инструмента, а также обладать диспергирующим действием. Вместе с тем, они не должны оказывать вредного влияния на окружающую среду.

Охлаждающее действие средств основано на эффекте теплообмена, а также за счет испарения среды, происходящего при поглощении тепловой энергии. *Смазывающее воздействие* средств сводится к образованию на трущихся поверхностях смазочной пленки, снижающей усилия резания и температуру в зоне резания. *Диспергирование* твердых тел основано на эффекте физико-химической механики (эффект П.А. Ребиндера). Если в зону обработки вводится активная среда, то достигается охрупчивание твердого тела и обеспечение процесса его разрушения. Как правило, используются расплавы металла, сходные с химическим составом и строением разрушаемого тела с целью отвлечения атомов при их перестройке в процессе резания. При этом есть опасность воздействия и на инструмент.

В зависимости от вида обработки, характера износа инструмента, свойств инструментального и обрабатываемого материалов, способа подвода вещества в зону резания, влияние смазочно-охлаждающих средств меняется, что необходимо учитывать при их работе. Так, при черновой обработке преобладающее значение имеет теплоотвод из зоны резания, следовательно, среда должна обладать наибольшими охлаждающими свойствами. При чистовых операциях преобладающее значение имеют смазывающие свойства средств, обеспечивающие повышение качества поверхности и незначительно – стойкости инструмента. При обработке труднообрабатываемых материалов преобладающими являются процессы адгезионного и диффузионного изнашивания, поэтому средства должны обеспе-

чить, в первую очередь, снижение этих вредных явлений за счет создания на поверхностях лезвия инструмента оксидных или иных пленок.

Современные средства разделяются на *газообразные, твердые и жидкие*. Они могут при своем использовании вступать в контакт с зоной резания или не находиться в непосредственном с ней контакте.

Газовые средства применяются в виде чистых газов, смесей газов или смеси газа с небольшим количеством смазочно-охлаждающих жидкостей (газово-жидкостная среда) или с частицами твердых СОС. В качестве охлаждающих газовых средств используются воздух, кислород, углекислота, азот. Наибольшее распространение получили газовые среды в виде атмосферного воздуха или воздушно-эмульсионной смеси.

Твердые СОС применяются в виде твердых пленок, наносимых на поверхность инструмента, теплопроводящих вставок, прилегающих к нагревающимся поверхностям и отводящих теплоту, мелких частиц, добавляемых к жидким или газовым средам (частицы графита, дисульфида молибдена и др.). К твердым смазкам относятся:

- 1) слоистые твердые смазочные материалы – дисульфид молибдена, нитрид бора, графит, слюда, тальк и др.;
- 2) органические соединения – мыла, воски, твердые жиры;
- 3) мягкие металлы – индий, свинец, олово, цинк, медь, барий;
- 4) полимерные пленки.

Наибольшее распространение получили смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ).

Смазочно-охлаждающие жидкости и способы их подачи в зону резания

СОЖ подразделяют на три группы:

1) минеральные масла различной вязкости с добавлением присадок – антифрикционных, противозадирных, смазывающих, антипенных, антикоррозионных, бактерицидных;

2) масляные эмульсии. Эмульсиями называют дисперсные системы из двух жидкостей, нерастворимых или малорастворимых друг в друге, получаемые растворением эмульсола в воде. Эмульсолы включают в себя базовое масло, эмульгатор или стабилизатор (обычно это соли жирных кислот, например, мыло), антифрикционные и другие присадки, перечисленные выше;

3) синтетические или химические жидкости на водной основе, не содержащие масла. К ним относятся растворы электролитов, многокомпо-

нентные коллоидные растворы органических и неорганических веществ, к которым добавляются вещества, пассивирующие поверхности обрабатываемого изделия, а также различные присадки.

Синтетические СОЖ обладают перед СОЖ 1-й и 2-й групп более высокими охлаждающими свойствами, устойчивостью против разложения и намного эффективнее при обработке труднообрабатываемых материалов.

Эмульсии изготавливают из эмульсолов различных составов. Наиболее распространенными марками эмульсолов являются следующие: Э2 – в состав входят масляный асидол (низкомолекулярная нафтеновая кислота), являющийся высокоэффективным поверхностно-активным веществом и одновременно эмульгатором, каустическую соду и этиловый спирт; ЭТ-2 – входит смесь масляного асидола и таллового масла; НГЛ-205 – сульфонат натрия, пассивирующие добавки и водорастворимые ингибиторы коррозии; СДМУ – дисульфид молибдена. Основой этих эмульсолов (около 75 %) является минеральное масло средней вязкости («индустриальное 12» или «индустриальное 20»).

Большое распространение получили минеральные масла, активированные серой – сульфифрезолы. Сульфифрезол состоит из осерненного нигрола или масляного гудрона – основы, полученной варкой с 10 – 12 % серы, смешанной с индустриальным маслом. Содержание серы в сульфифрезоле не должно быть меньше 1,7 %. Благодаря присутствию серы сульфифрезол хорошо сохраняет смазочные свойства при высоких контактных давлениях и температурах.

Подачу СОЖ в зону резания осуществляют: 1) поливом свободно падающей струей; 2) напорной струей; 3) струей воздушно-жидкостной смеси (в распыленном состоянии); 4) через каналы в теле режущего инструмента. При свободном поливе (рис. 24.1, а) СОЖ омывает как стружку, так и инструмент. Этому способу присущи недостатки: 1) большой расход жидкости; 2) сильное разбрызгивание жидкости при высоких скоростях вращения заготовки и инструмента; 3) невозможность наблюдения за зоной обработки; 4) вследствие постоянной циркуляции в замкнутой системе жидкость постепенно нагревается и частично теряет свои охлаждающие свойства.

Подача СОЖ струей под напором (рис. 24.1, а) осуществляется при давлении $p = 0,5 - 15 \text{ кг/см}^2$, диаметре жиклера – 0,8...5 мм, скорости $v = 40...60 \text{ м/с}$. Иногда подачу СОЖ высоконапорной струей комбинируют с поливом СОЖ. При этом стойкость инструмента повышается на 20 – 25 %. Недостатки подачи СОЖ под напором: 1) необходимость тщательной очи-

стки жидкости; 2) необходимость оснащения станка специальной насосной станцией; 3) сильное разбрызгивание жидкости.

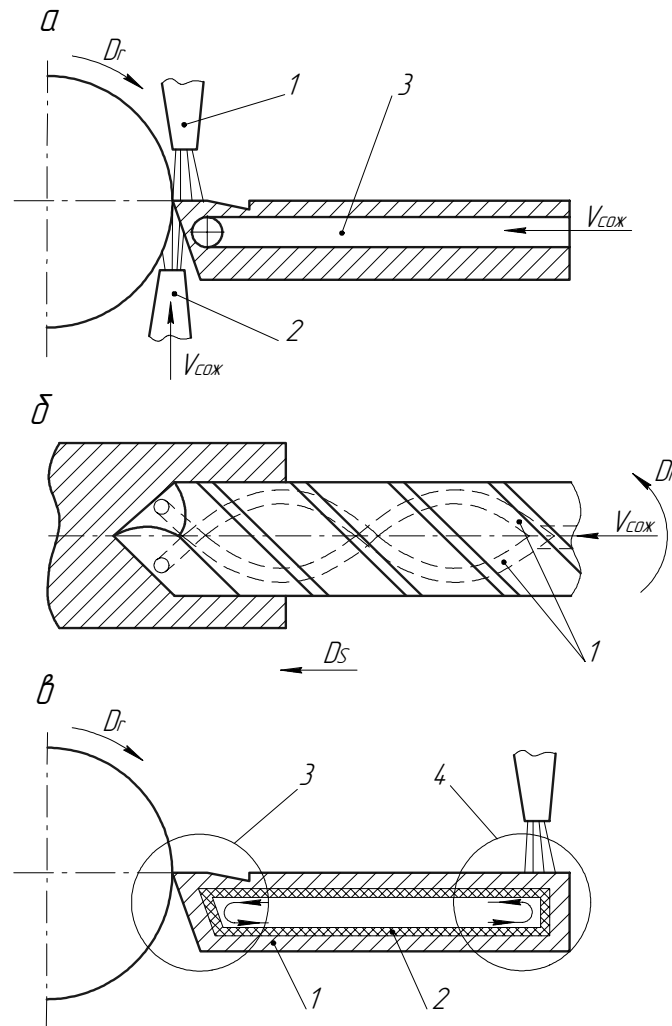


Рис. 24.1. Способы подачи СОЖ в зону резания:

а – при точении поливом из сопла 1, под давлением из сопла 2, через внутренний канал 3; б – при сверлении через внутренние каналы 1; в – при точении резцом 1 с тепловой трубой и пористым наполнителем 2, теплообменной 3 и теплопередающей 4 зонами

Распыленная жидкость оказывает повышенное смазочное и охлаждающее действие. Ее следует применять в тех случаях, когда полив жидкостью невозможен или когда он малоэффективен, а также, когда необходимо постоянное наблюдение за зоной обработки.

Способ подачи СОЖ через каналы в теле инструмента получил широкое распространение при обработке осевым инструментом (см. рис. 24.1, б). В этом случае обеспечивается не только транспортирование СОЖ, но и удаление из зоны резания стружки. Этот способ применяется и в других

режущих инструментах, например, в резцах, когда через его тело циркулирует СОЖ, выполняющая только одну функцию – охлаждение контактных площадок резца.

Идея внутреннего охлаждения инструментов получила в последнее время развитие в конструкциях «двухфазных систем» внутреннего охлаждения инструмента, в которых используется эффект охлаждения от поглощения теплоты при переходе различных веществ из одного агрегатного состояния в другое (рис. 24.1, в). В инструменте делают внутреннюю полость, разделенную на две зоны: 1) теплообменную 3, отделенную тонкой пленкой от источника тепла – контактной площадки инструмент – деталь; 2) теплопередающую 4, соединенную с первой зоной средствами для подвода и отвода испаряемого жидкого охлаждения (воды, фреона, жидкой соды, металла). Внутреннюю поверхность полости выстилают капиллярной сеткой 2 (например, тканевой). По этой сетке охладитель поступает из теплопередающей зоны в теплообменную, где испаряется, поглощая теплоту, и вследствие разности давления в различных сечениях внутренней полости резца передает ее в теплопередающую зону, температура которой поддерживается ниже точки конденсации благодаря охлаждению наружной поверхности державки сжатым воздухом. В теплопередающей зоне охладитель конденсируется, а выделяющаяся при этом теплота передается через стенку резца к более холодной внешней поверхности. Жидкий охладитель накапливается в теплопередающей зоне и весь цикл передачи и испарения охладителя повторяется, обеспечивая непрерывный отбор теплоты от режущей кромки резца.

Для повышения эффективности действия СОЖ используют ультразвуковые и магнитные поля, световое облучение. Радикальным средством изменения физической и химической активности СОЖ является регулирование ее температуры. В силу ряда эксплуатационных трудностей нагретые СОЖ в промышленности пока не применяются, охлажденные же жидкости стали находить успешное применение. По данным исследований охлаждение СОЖ до $-40 \dots -50$ °С позволяет повысить скорость резания на 35 % и в 2 – 5 раз поднять стойкость инструмента. Если нет условий для охлаждения СОЖ, то надо хотя бы поддерживать температуру СОЖ на уровне $16 - 20$ °С. Охлаждающее действие СОЖ можно также повысить путем ее динамической активации, т. е. увеличения скорости ее движения.

ЛЕКЦИЯ 25

Виды комбинированной обработки резанием. Характеристики комбинированной обработки

Виды комбинированной обработки резанием

Виды комбинированной обработки резанием классифицируют по таким признакам как схема формообразования (кинематическая схема резания); вид энергии и способ ее подвода; вид физико-химического воздействия. Кинематические схемы резания рассмотрены в лекции 3; вид энергии: механическая, электрическая, химическая, тепловая и ядерная; способ подвода энергии определяется взаимным расположением инструмента и заготовки; вид физико-химического воздействия: пластическое деформирование с последующим разрушением; плавление, испарение, анодное растворение, эрозионное разрушение.

Исходя из этого, различают:

- 1) резание с дополнительным механическим воздействием, например, пластическим деформированием – М;
 - 2) вибрационное резание с наложением колебаний, а также с использованием химических сред – М + К, М + К + Х;
 - 3) сверхскоростное резание, характеризуемое механическим воздействием с хрупким разрушением материала – М;
 - 4) резание в специальных средах, например, химических – М + Х;
 - 5) резание с нагревом – (М + Т);
 - 6) резание с электротоком – М + Э (тепловое);
 - 7) электроконтактную обработку – М + Э_{Т+Э} (тепловое и эрозионное);
 - 8) анодно-механическую обработку – М + Э_(Т+Х+Э);
 - 9) электрохимическую обработку – Э_х;
 - 10) электроэрозионную обработку – Э_э;
 - 11) электронно-лучевую обработку – Э_т;
 - 12) лазерную обработку – Э_л;
 - 13) плазменную обработку – П;
 - 14) плазменно-механическую обработку – П + М;
- Рассмотрим некоторые разновидности комбинированной обработки.

Характеристики комбинированной обработки

Резание с опережающим пластическим деформированием (ОПД) предусматривает совмещение двух процессов – ОПД и процесса резания (рис. 25.1, а). При этом часть работы пластического деформирования при резании выполняется дополнительным устройством. Это обеспечивает снижение силы и температуры резания, повышение стойкости режущего

инструмента и производительности обработки. Воздействие деформирующего инструмента может быть оказано на поверхность резания или на обрабатываемую поверхность. ОПД может осуществляться с помощью рифленого ролика, что обеспечивает надежное стружкодробление. При этом рифленый ролик может быть самовращающимся (от вращающейся детали) и принудительно вращающимся (привод). ОПД применяется при точении, ротационном точении, фрезеровании, протягивании, абразивной обработке.

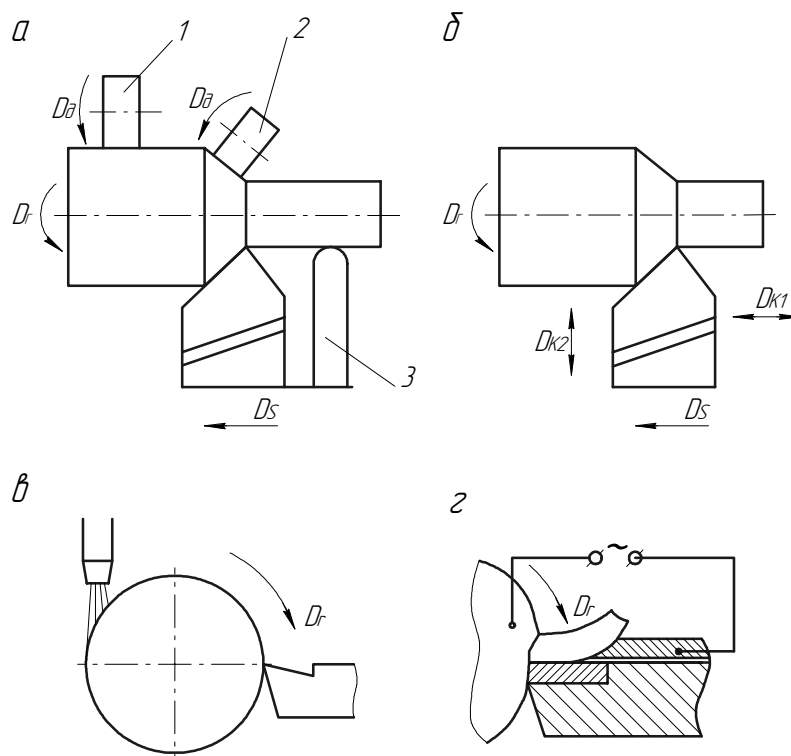


Рис. 25.1. Схемы комбинированных видов механической обработки:
 а – пластическим деформированием элементом, опережающим 1, параллельным 2, последовательным 3; б – с колебаниями; в – с плазменным подогревом;
 г – с электроподогревом

При *резании с последующим пластическим деформированием (ППД)* деформирующий элемент располагается за режущим инструментом в направлении, обратном направлению подачи. Деформирующий элемент играет роль «выглаживателя». В этом случае осуществляется упрочнение и повышение качества обработанной поверхности.

Резание с вибрациями или вибрационное резание заключается в том, что на обычно принятую для данной операции кинематическую схему резания накладывается дополнительное направленное вибрационное движение инструмента относительно заготовки. В этом случае реализуются положительные свойства вибраций в виде надежного дробления стружки и улучшения обрабатываемости, прежде всего, труднообрабатываемых материалов.

Физические особенности этого процесса состоят в кратковременном изменении скорости и углов резания, цикличности нагрузки, снижении сил трения, повышении эффективности проникновения смазочно-охлаждающих средств в зону резания. Вибрационное резание подразделяют по виду вибраций режущего инструмента или заготовки и типу вибропривода. По частоте колебаний различают вибрации низко- (до 200 Гц) и высокочастотные (от 200 до 15000 Гц), а также ультразвуковые (свыше 15000 Гц). Вибрации малой частоты могут быть линейными или угловыми (см. рис. 25.1, б).

Низко- и высокочастотные колебания в основном применяются для дробления стружки. Ультразвуковые колебания способствуют ликвидации нароста, уменьшению зоны первичной деформации и, как следствие, снижению сил резания и шероховатости обработанной поверхности, а также повышению в 1,3 раза производительности резания.

В качестве виброприводов используют гидравлические, электрические и механические, а также их комбинации.

Сверхскоростное резание осуществляется в диапазоне скоростей более 10000 м/мин, основывается на уменьшении области пластической деформации и способствует хрупкому разрушению металла. При сверхскоростном резании наблюдается снижение температуры резания и обеспечивается повышение производительности обработки. Высоко- и сверхскоростное резание реализуется на современных станках с частотой вращения до 60000 мин⁻¹ и установках с использованием взрывчатых веществ (ракеты, пушки, ружья), электромагнитных полей и ускорения свободного падения (копры).

Резание с нагревом срезаемого слоя применяется, прежде всего, при обработке труднообрабатываемых материалов (см. рис. 25.1, в, г). Резание с нагревом может осуществляться как по схеме последовательного совмещения основного воздействия с тепловым, так и по схеме параллельного воздействия обоих факторов. Наиболее распространен первый метод. В этом случае дополнительное воздействие осуществляется нагревом всей заготовки в печах или путем использования тепла предыдущей операции. Используют нагрев поверхностного слоя заготовки токами высокой частоты (ТВЧ), инфракрасным излучением, электрической дугой, струей плазмы или лучом лазера. Нагрев снижает механические показатели и повышает пластичность обрабатываемого материала. При температуре $\theta = 780 - 860$ °С сила резания снижается на 20...25 %. Например, при точении титанового сплава ВТЗ-1 с нагревом $\theta = 500$ °С контактное давление на инструмент из твердого сплава ВК8 в два раза ниже, чем при обработке без нагрева.

При *резании с низкотемпературным охлаждением* заготовки или инструмента в зону обработки подается антифризная жидкость с добавлением глицерина (-10 °С) или жидкий азот. При этом повышается теплоотвод, изменяются физико-механические свойства материалов, снижаются показатели деформации срезаемого слоя и качество обработки, возрастает в 1,5 раза стойкость инструмента.

В *электрохимических и электроэрозионных видах обработки* используется электрическая энергия через химическое, тепловое и механическое воздействие. Механизм съема металла при электрохимической обработке основан на электролизе – процессе окисления (растворения) и восстановления (осаждения) поверхности электродов, помещенных в токопроводящий раствор – электролит. Один из электродов, например, заготовка присоединяется к положительному полюсу и является анодом, а второй, например, инструмент – к отрицательному и является катодом. В результате взаимодействия катода и анода происходит растворение последнего и удаление растворенной части инструментом. При этом взаимодействие инструмента и заготовки может происходить по кинематической схеме отрезания, точения, прошивания, шлифования, заточки, полирования, доводки, суперфиниширования. Наиболее эффективна электрохимическая обработка в случае обработки труднообрабатываемых материалов и для исключения нагрева заготовки.

Электроэрозионная обработка заключается в изменении формы, размеров, шероховатости и свойств поверхности заготовки под воздействием электрических разрядов в результате электрической эрозии (ГОСТ 25331-82). Возникающий между электродом-инструментом и электродом-заготовкой импульс электрической энергии преобразуется в тепловую, за счет чего происходит нагрев, расплавление и испарение материала. При этом кинематическая схема реализации электроэрозионной обработки, так же как и в случае электрохимической может быть различной. Наибольший эффект достигается в случае обработки труднообрабатываемых материалов, отверстий и полостей сложной формы и малых размеров. Разновидностью электроэрозионной обработки является *электроконтактная обработка*, которую классифицируют по напряжению и характеру разряда на контактную, контактно-дуговую и дуговую. Кинематические схемы электроконтактной обработки отверстий, пазов, плоских поверхностей и резки заготовок разнообразны, как и в случае электроэрозионной обработки.

Электронно-лучевая обработка основана на воздействии на материал заготовки пучка электронов, кинетическая энергия которого, преобразуясь в рабочей зоне в тепловую, вызывает нагрев, плавление и испарение обрабатываемого материала.

При *светолучевой обработке* воздействие на материал заготовки оказывает сфокусированное поли- или монохроматическое излучение. В последнем случае процесс называется лазерной обработкой.

При *плазменной обработке* происходят процессы, при которых в результате воздействия низкотемпературной плазмы ($\theta = 3 \cdot 10^3 \dots 3 \cdot 10^4$ °С) возникают изменения химического состава, структуры или физического состояния обрабатываемого материала.

Применение этих видов обработки зачастую сочетается с механическими видами (см. рис. 25.1, в, г).

ЛЕКЦИЯ 26

Общие положения теории оптимизации. Оптимизация функционирования системы резания

Общие положения теории оптимизации

Теория оптимизации в современном представлении включает в себя совокупность фундаментальных математических результатов и численных методов, ориентированных на нахождение наилучших вариантов из множества альтернатив и позволяющих избежать полного перебора в оценке возможных вариантов.

Оптимальная система (от лат. *optimus* – наилучший) – это система, для которой выработанные определенным образом критерии принимают оптимальные значения. Такими критериями могут быть, например, быстродействие, минимум затрат, точность и др., либо обобщенные критерии, представляющие собой функцию нескольких величин.

Оптимизация системы резания – это выбор такого варианта управления процессом резания, при котором достигается экстремальное значение критерия, характеризующего качество управления. При этом разделяются два понятия: критерий оптимизации и критерий оптимальности. Критерий оптимизации или целевая функция – это критерий, который определяет качество управления процессом, а критерий оптимальности – его заданная величина. В свою очередь *критерии оптимизации* разделяются на дифференциальные и интегральные. К дифференциальным или локальным критериям относятся физические (удельная энергоемкость процесса, температура резания, интенсивность изнашивания инструмента и др.). Интегральные и обобщенные критерии основаны на комплексной оценке разных сторон процесса резания (скрытая энергия деформирования поверхностного слоя детали) или комбинация различных оценок одного и того же критерия при решении минимаксных задач оптимизации. По назначению оптимизацию подразделяют на структурную, предназначенную для оптимального построения структуры (последовательности) переходов и операций при механической обработке, и на параметрическую – для назначения оптимальных параметров процесса резания. *Оптимизация* может быть *внешней*, реализуемой вне станка, и *внутренней*, осуществляемой при обработке на станке. В зависимости от поставленных целей оптимизация может быть одноцелевой, когда ищется экстремум одной целевой функции, и *многокритериальной (многоцелевой)* при поиске экстремума нескольких критериев оптимизации. Для автоматизированного производства многокритериальная оптимизация представляется наиболее перспективной, так

как она призвана разрешить противоречия между экономическими показателями процесса резания и условиями его протекания.

Оптимизация может выполняться в *детерминированной (статической)* постановке при постоянных значениях всех входящих в модель параметров и в *стохастической (динамической)* постановке при учете вероятностной природы процесса резания.

При многокритериальной оптимизации важен правильный выбор критериев. Один из путей учета совокупностей противоречивых целевых установок состоит в выборе первичного критерия, тогда как остальные относятся к вторичным. Важен также выбор граничных условий, независимых переменных и уровень детализации системы. При параметрической оптимизации обработки резанием критерии могут быть как экономические, так и физические, и ее нельзя отрывать от структурной оптимизации всего технологического процесса изготовления детали. В свою очередь, в ряде производственных систем нельзя оценивать технологический процесс в отрыве от особенностей этих систем и факторов, учитывающих место детали в готовом изделии.

Исходя из этих положений, задача оптимизации представляется в общем виде: $Q' = \text{extr} \{f_0(x, \omega) \mid x \in D\}$, при технологических ограничениях $g(x, \omega) \leq 0$; $f(x) \leq 0$; $a_i \leq x_i \leq b_i$, где $f_0(x, \omega)$ – критерий оптимизации, зависящий от управляемых x и постоянных ω параметров процесса; D – область допустимых значений x ; a_i, b_i – постоянные.

Математическая модель глобальной задачи: $F(x) - F_0 \leq 0$, где $x \in X$; F_0 – постоянная; $F(x)$ – величина производственного цикла изготовления детали; X – множество, отражающее систему ограничений по свойствам конструкции, особенностям производственной системы и технологические ограничения.

Для решения глобальной задачи используется метод декомпозиции, состоящий в том, что решение глобальной задачи основывается на совокупности решения локальных задач: $F(x_i) \leq 0, x_i \in D_i$, при условии оптимальности $W_i(x_i) = \min_{x_i \in D_i} W_i(x_i)$.

Оптимизация функционирования системы резания

С учетом этих общих представлений под *оптимизацией функционирования системы резания* понимается определение наилучших параметров (свойств), сочетаний и связей элементов обрабатывающей системы (станка, приспособлений, инструментов, деталей, технологических сред, кинематической схемы вида обработки, режима резания (v, S, t)), имеющих ме-

сто на входе системы резания, а также характеристик процесса резания (контактных, динамических, тепловых и т. д.) по техническим, в том числе технологическим и физическим, организационным и экономическим критериям, обеспечивающим наилучшие показатели на выходе системы резания (производительности, качества, стойкости, себестоимости).

Оптимизация процесса резания чаще всего обуславливается характеристиками *обрабатываемости* материалов резанием. Под *обрабатываемостью материалов* понимают способность материалов подвергаться резанию по ряду технологических показателей. Основными показателями, характеризующими обрабатываемость материала, являются: 1) скорости резания, с которыми наиболее рационально обрабатывать заготовку; 2) возможность получения необходимой точности обработки при чистовых операциях, характеризуемой интенсивностью размерного износа инструмента; 3) возможность получения необходимых параметров шероховатости и качества обработанной поверхности при отделочных операциях, определяемых в основном склонностью к адгезии инструментального и обрабатываемого материалов и пластичностью последнего; 4) силы, возникающие при резании, и потребная мощность; 5) характер образования стружки и ее деформации; 6) температура резания. В зависимости от вида и характера обработки те или иные технологические показатели становятся определяющими. Например, при черновой обработке – производительность, силы резания и условия транспортировки стружки, при чистовой – шероховатость, наклеп и остаточные напряжения.

Комплексное определение показателей обрабатываемости позволяет подобрать материал, не только удовлетворяющий эксплуатационным требованиям, предъявляемым к детали, но и обеспечивающий минимальную стоимость механической обработки резанием.

Поскольку производительность и себестоимость обработки зависит, главным образом, от допускаемой скорости резания, то для любого вида и характера обработки основным показателем обрабатываемости является скорость резания, величина которой определяется изнашивающим действием, оказываемым обрабатываемым материалом на контактные поверхности инструмента. Поэтому в узком понимании обрабатываемость материалов характеризуется допускаемой скоростью резания (см. лекцию 22). Считают, что лучшую обрабатываемость имеет тот материал, который при прочих равных условиях допускает более высокую скорость резания. Количественно обрабатываемость оценивают *коэффициентом обрабатываемости*, представляющим собой отношение скорости резания, допускаемой при резании определенного материала, к скорости резания, допускаемой материалом, принятым за эталонный. Если коэффициент обрабатываемости больше 1, то данный материал обрабатывается лучше, чем эталонный, а если меньше 1, то хуже.

Существуют различные методы определения обрабатываемости. Например, в основе классического метода лежит нахождение зависимости: $v = \frac{C}{T^m}$. При этом производится точение торца диска из обрабатываемого материала от центра к периферии. Резец доводят до окончательного затупления. Имея значения C и m для обрабатываемого материала, определяют скорость резания, соответствующую периоду стойкости $T = 60$ мин и по ним находят коэффициент обрабатываемости. Используется также положение, что интенсивность износа резца практически независима от величины износа. Обтачивая заготовку при постоянных значениях t и S с различными v , фиксируют для каждой скорости прирост линейного износа задней поверхности δ , соответствующий времени работы резца T . Затем для каждой скорости определяем интенсивность износа резца $I = \frac{\delta}{T}$. Строят зависимость $I = f(v)$ в двойной сетке, представляющей собой прямую, тангенс угла наклона ψ которой к оси I равен показателю относительной стойкости m в формуле $v = \frac{C}{T^m}$. Затем определяют эквивалентную интенсивность износа

$$I_{\text{экв}} = \frac{\delta_1 + \dots + \delta_n}{T_1 + \dots + T_n}, \text{ по графику находят } v_{\text{экв}}, \text{ затем } C = v_{\text{экв}} T^{tg\psi}.$$

Обрабатываемость материалов определяется их химическим составом, структурным состоянием, а следовательно, и их теплофизическими свойствами. К ним следует отнести прочность, пластичность, вязкость и теплопроводность материала. Химические элементы, входящие в состав современных конструкционных материалов по степени их влияния на обрабатываемость можно условно разделить на три группы: 1) для сталей на ферритной основе – углерод и кремний; 2) хром, вольфрам, ванадий и молибден; 3) марганец и никель – фактически не влияют на обрабатываемость. Увеличение процентного содержания углерода ухудшает обрабатываемость. Для удобства оценки обрабатываемости при расчете режимов резания все материалы разделяют на отдельные группы: 1) углеродистые, легированные, конструкционные, инструментальные стали; 2) нержавеющей, жаропрочные и жаростойкие; 3) титановые; 4) чугуны. Улучшение обрабатываемости достигается за счет соответствующего отжига или отпуска, добавления серы, селена, телура, свинца, висмута, применения СОЖ.

Как для определения обрабатываемости материалов, так и в целом для оптимизации функционирования системы резания необходима грамотная постановка эксперимента.

ЛЕКЦИЯ 27

Классическая методика постановки эксперимента при резании. Метод планирования эксперимента

Классическая методика постановки эксперимента при резании

При резании материалов наиболее широко применяются так называемая классическая методика постановки эксперимента и метод планирования эксперимента. *Классическая методика* получения эмпирических зависимостей характеристик процесса резания от параметров обработки основана на проведении экспериментов при последовательном изменении одного из факторов при неизменности остальных (однофакторный эксперимент).

Для того, чтобы установить связь между изменением независимой переменной, например, глубины резания t , подачи S и скорости резания v и изменением зависимой переменной, например, составляющих силы резания P_z , P_y , P_x поступают следующим образом. Проводят опыты по сериям. В каждой серии изменяют лишь один из элементов режима резания, например, в первой серии – t . Остальные элементы режима резания – S , v , в этой серии оставляют постоянными. Во второй серии опытов за переменную величину берут другой параметр, например, S . Неизменными в данной серии оставляют t и v . В третьей серии изменяют параметр v и соответственно неизменными оставляют t и S . Результаты опытов заносят в протокол исследования, где в каждой серии рядом со значением изменяемого элемента режима резания записывается значение силы резания.

Очевидно, что общая степенная формула типа $P = C_p \cdot t^{x_p} S^{y_p} v^{z_p}$ для каждой из серий опытов будет иметь более простой вид. Например, для серии изменения глубины резания:

$$P = C_{pt} \cdot t^{x_p},$$

где $C_{pt} = C_p \cdot S^{y_p} v^{z_p}$.

Если прологарифмировать данное степенное выражение, то получим уравнение прямой:

$$\lg P = \lg C_{pt} + x_p \lg t.$$

При построении ее в логарифмической системе координат (см. рис. 11.3), получим прямую, тангенс угла наклона которой определяет показатель x_p .

Значения C_p можно определить: 1) по графику для значения аргумента, равного 1, например, при $t = 1$ – $P = C_{pt}$ и $C_p = \frac{C_{pt}}{S^{y_p} v^{z_p}}$. И так для каж-

дой серии опытов, а затем определяется среднее значение; 2) из общей формулы $C_p = \frac{P}{t^{x_p} S^{y_p} U^{z_p}}$.

Целесообразнее коэффициент C_p определять не по любому опыту данной серии, а по тому, который повторяется в каждой серии. Из трех полученных коэффициентов берется среднеарифметическое $C_p = \frac{C'_p + C''_p + C'''_p}{3}$.

Классическая методика исследований трудоемка, так как требует проведения большого количества опытов и затрат материалов. Кроме того, она не учитывает взаимовлияния изменяемых факторов, в результате чего полученные эмпирические зависимости недостаточно точно и полно описывают существующую в действительности связь выходных характеристик процесса резания с параметрами обработки.

Метод планирования эксперимента

Наиболее эффективно использование при резании *методов математической статистики*. Математическая теория эксперимента и ее раздел – *планирование эксперимента*, представляют собой новый подход к исследованию, в котором математическим методам отводится активная роль на всех этапах исследования: при формализации априорных сведений, перед постановкой опытов, при планировании эксперимента, обработке его результатов и при принятии решений.

Наибольшее значение для практики резания имеет планирование экстремальных экспериментов, когда по наибольшему и наименьшему значениям параметров проводят оптимизацию процесса резания. Одним из наиболее распространенных методов планирования экстремальных экспериментов является метод Бокса – Уилсона или так называемый метод крутого восхождения. Метод Бокса – Уилсона предусматривает проведение опытов небольшими сериями. В каждой серии опытов одновременно группируются все факторы по определенным правилам. Опыты проводят так, чтобы после математической обработки результатов предыдущей серии можно было спланировать следующую серию опытов.

При планировании экстремального эксперимента формулируют цель исследования или, иначе говоря, выбирают параметр оптимизации. Входные переменные, влияющие на параметр оптимизации, называются факторами. Необходимо учитывать все действующие факторы.

Решение экстремальной задачи предусматривает получение функции отклика факторов и нахождение с помощью нее оптимальных условий

протекания процесса. В общем случае функция отклика может быть представлена в виде математической модели:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k). \quad (27.1)$$

При прочих равных условиях наиболее предпочтительным является выбор модели в виде полинома:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + \dots \quad (27.2)$$

На первом этапе планирования эксперимента для определения движения к оптимуму и крутого восхождения по поверхности отклика, функцию отклика аппроксимируют полиномом первой степени:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 \dots + b_kx_k. \quad (27.3)$$

Для определения коэффициентов этого уравнения достаточно реализовать факторный эксперимент типа 2^k , где k – число факторов. Это планы первого порядка.

Рассмотрим полный факторный эксперимент, реализующий все возможные неповторяющиеся комбинации уровней независимых факторов, каждый из которых, в свою очередь, варьируется на двух уровнях. Построение модели методом полного факторного эксперимента состоит из:

- планирования эксперимента;
- проведения эксперимента;
- проверки воспроизводимости (однородности выборочных дисперсий);
- получения математической модели объекта с проверкой статистической значимости выборочных коэффициентов регрессии;
- проверки адекватности математического описания.

Рассмотрим данный подход на примере зависимости температуры резания от режима резания:

$$\theta = C_\theta \cdot t^{x_\theta} \cdot S^{y_\theta} \cdot v^{z_\theta}. \quad (27.4)$$

При логарифмировании зависимости (27.4) получим уравнение первой степени:

$$\lg \theta = \lg C + x \lg t + y \lg S + z \lg v. \quad (27.5)$$

Введем обозначения:

$$\lg \theta = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3, \quad (27.6)$$

где x_1, x_2, x_3 – факторы;

b_0, b_1, b_2, b_3 – коэффициенты регрессии.

Решение уравнения (27.6) получается путем варьирования каждого из факторов x на двух уровнях: верхнем $x_{ив}$ и нижнем $x_{ин}$. Значения факторов берутся в кодированном виде. Верхний уровень фактора обозначается (+1), нижний – (-1). Уровни факторов и интервалы варьирования заносятся в табл. 27.1.

Таблица 27.1

Уровни и интервалы варьирования факторов

Уровень	Код	Элементы режима резания (факторы)		
		t, мм (x ₁)	S, мм/об (x ₂)	v, м/мин (x ₃)
		факторы		
Верхний	+1	2	0,3	20
Нижний	-1	1	0,1	10

Затем составляется матрица планирования эксперимента. В нашем случае для трех факторов (2^3), т. е. восьми опытов, она будет иметь вид, представленный в табл. 27.2.

Таблица 27.2

Матрица планирования эксперимента

№ опыта	Код			Результаты		
	x ₁	x ₂	x ₃	1-го измерения	2-го измерения	средний
	t	S	v			
1	-1	-1	-1	θ ₁	θ ₁	θ ₁
2	+1	-1	-1	θ ₂	θ ₂	θ ₂
3	-1	+1	-1	θ ₃	θ ₃	θ ₃
4	+1	+1	-1	θ ₄	θ ₄	θ ₄
5	-1	-1	+1	θ ₅	θ ₅	θ ₅
6	+1	-1	+1	θ ₆	θ ₆	θ ₆
7	-1	+1	+1	θ ₇	θ ₇	θ ₇
8	+1	+1	+1	θ ₈	θ ₈	θ ₈

Коэффициенты регрессии определяются по формуле:

$$b_i = \sum_{j=1}^k \frac{x_{ji} y_i}{k}, \quad (27.7)$$

где $j = 0, 1, 2, \dots$ – номер фактора (ноль для вычисления b_0);

i – номер опыта в матрице планирования;

k – количество опытов в матрице;

y_i – средний отклик по k опытам в точке с номером i .

Например, коэффициент регрессии для зависимости (27.6) можно определить по формулам:

$$b_0 = \frac{\lg \theta_1 + \dots + \lg \theta_8}{8}; \quad (27.8)$$

$$b_1 = \frac{-\lg \theta_1 + \lg \theta_2 - \dots + \lg \theta_8}{8}; \quad (27.9)$$

и соответственно факторы по формулам

$$x_1 = \frac{2(\lg t - \lg t_{cp})}{\lg t_{\max} - \lg t_{\min}}; \quad (27.10)$$

$$x_2 = \frac{2(\lg S - \lg S_{cp})}{\lg S_{\max} - \lg S_{\min}}; \quad (27.11)$$

$$x_3 = \frac{2(\lg v - \lg v_{cp})}{\lg v_{\max} - \lg v_{\min}}. \quad (27.12)$$

Значения b и x подставляются в формулу (27.5), она потенцируется и получается формула с численными значениями коэффициентов и показателей степени.

Для проверки правильности полученной формулы вычисляются значения температуры для максимальных значений элементов режима резания и сравниваются с экспериментально замеренной температурой резания.

Кроме того, необходимо доказать выполнение второй предпосылки регрессионного анализа об однородности выбранных дисперсий и адекватности модели. Дисперсией называется среднее значение квадрата отклонений случайной величины от ее среднего значения и определяется она по формуле:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^k (y_i - y_{cp})^2}{k-1} = \frac{\sum_{i=1}^n (\theta_i - \theta_{cp})^2}{k-1}, \quad (27.13)$$

где i – номер опыта;

y_i – значение параметра оптимизации в i -том параллельном опыте;

y_c – среднее арифметическое значение параметра оптимизации в i – тых параллельных опытах;

c – число параллельных опытов.

Проверка однородности двух дисперсий производится с помощью критерия Фишера по формуле:

$$F_p = \frac{S_1^2}{S_2^2}, \quad (27.14),$$

где $S_1^2 > S_2^2$ или критерия Кохрена по формуле

$$G_{\max} = \frac{S_{g\max}^2}{\sum_{i=1}^k S_g^2} = \frac{(\theta_1 - \theta_{cp})^2_{\max}}{\sum_{i=1}^k (\theta_1 - \theta_{cp})^2}. \quad (27.15)$$

Если полученные значения критериев F_p или G_{\max} меньше табличного, то дисперсии однородны, и полученная математическая модель адекватна экспериментальным условиям.

ЛЕКЦИЯ 28

Определение рационального режима резания. Расчёт режима резания при многоинструментальной обработке. Расчет режима резания на автоматических линиях и агрегатных станках. Оптимизация режима резания методом линейного программирования

Определение рационального режима резания

Аналитический метод определения рационального режима резания основан на определении глубины резания t , подачи S и скорости резания v по таким ограничениям, как прочность механизмов станка, прочность и жесткость инструмента и заготовки, шероховатость обработанной поверхности. Метод осуществляется в следующей последовательности: 1) выбор марки инструментального материала и геометрии режущего лезвия инструмента; 2) определение глубины резания; 3) определение допускаемой подачи; 4) определение скорости резания.

Рассмотрим реализацию метода на примере токарной обработки.

1. Выбор марки инструментального материала и геометрии лезвия резца производится в зависимости от свойств обрабатываемого материала, вида и характера обработки и требуемой шероховатости поверхности детали по справочникам.

2. Глубина резания чаще всего определяется как полуразность диаметров в среднем машиностроении, а в тяжелом – как общий припуск, снимаемый за несколько проходов.

3. При определении наибольшей технологически допускаемой подачи учитываются: а) прочность механизма подачи станка; б) прочность резца; в) жесткость резца; г) прочность изделия; д) жесткость изделия; е) шероховатость обработанной поверхности.

Подача, допускаемая прочностью механизма подачи станка.

В механизме подачи станка слабым звеном является шестерня, сцепляющаяся с рейкой, прикрепленной к станине станка.

Расчетное условие:

$$P_x \leq Q_{\text{доп.шест.}}$$

где P_x – осевая составляющая силы резания;

$Q_{\text{доп.шест.}}$ – усилие, допускаемое механизмом подачи станка (шестерней).

$Q_{доп.шест.}$ выбирается из паспорта станка. Поскольку скорость неизвестна, то в формулу $P_x = C_{px} \cdot t^{x_{px}} \cdot S^{y_{px}} \cdot v^{z_{px}} \cdot k_{px}$ подставляется поправочный коэффициент на скорость k_{vx} . И тогда

$$P_x = C_{px} \cdot t^{x_{px}} \cdot S^{y_{px}} \cdot k_{px} \cdot k_{vx}. \quad (28.1)$$

Отсюда

$$S_1 \leq y_{px} \sqrt{\frac{Q_{доп.шест.}}{C_{px} \cdot t^{x_{px}} \cdot S^{y_{px}} \cdot k_{px} \cdot k_{vx}}}. \quad (28.2)$$

Подача, допускаемая прочностью резца (рис. 28.1):

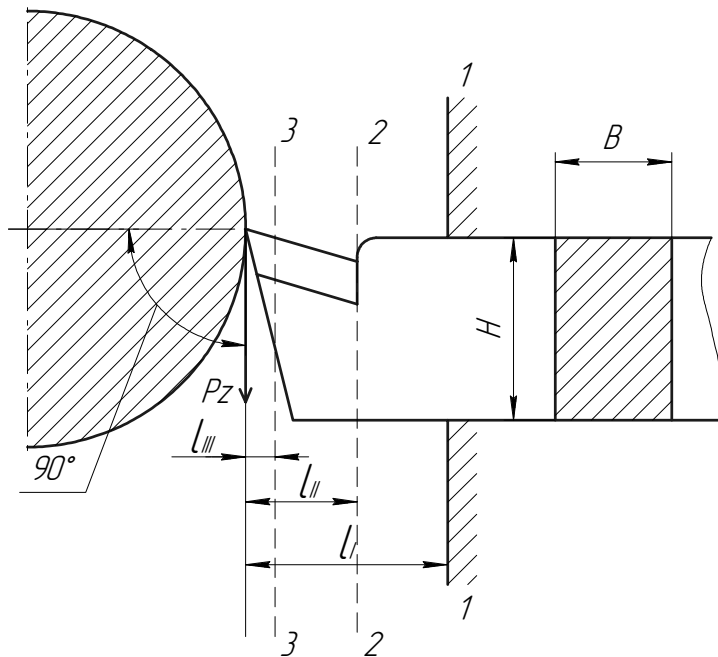


Рис. 28.1. Схема для расчета подачи, допускаемой прочностью резца

Расчетное условие:

$$M_{из} \leq [M_{из}]_{доп},$$

где $M_{из}$ – изгибающий момент от силы P_z ;

$[M_{из}]$ – допускаемый изгибающий момент.

$$P_z \cdot l \leq [\sigma]_u \cdot W,$$

где W – момент сопротивления резца изгибу,
или

$$C_{pz} \cdot t^{x_{pz}} \cdot S^{y_{pz}} \cdot k_{pz} \cdot k_{vz} \cdot l \leq [\sigma]_u \cdot \frac{BH^2}{6},$$

Отсюда

$$S_2 \leq y_{px} \sqrt{\frac{[\sigma]_u \cdot BH^2}{6C_{pz} \cdot t^{x_{pz}} \cdot k_{vx} \cdot k_{pz} \cdot l}}. \quad (28.3)$$

Данная формула справедлива как для цельных, так и для напайных резцов. В последнем случае, однако, кроме сечения, проходящего на расстоянии l_1 (рис. 28.1) необходимо проверить также и сечение на расстоянии l_2 , ослабленное вследствие выреза в державке для режущей пластины. В случае, если пластина изготовлена из твердого сплава, опасным может оказаться и сечение на расстоянии l_3 , зависящее от толщины пластины и угла α .

Подача, допускаемая жесткостью резца.

Рассчитывается из условия максимально допускаемой стрелы прогиба резца под действием силы резания P_z .

$$f_{уз2} \leq [f];$$

$$\frac{P_z \cdot l^3}{3EI} \leq [f], \text{ или } \frac{C_{pz} \cdot t^{x_{pz}} \cdot S^{y_{pz}} \cdot k_{pz} \cdot k_{vz} \cdot l^3}{3EI} \leq [f],$$

где $I = \frac{BH^3}{12}$ – момент инерции;

$[f] = 0,1$ мм – при черновом точении;

$[f] = 0,05$ мм – при чистовом точении.

Тогда

$$S_3 \leq y_{p\pi} \sqrt{\frac{[f]_u E \cdot BH^3}{4C_{pz} \cdot t^{x_{pz}} \cdot k_{vz} \cdot k_{pz} \cdot l^3}}. \quad (28.4)$$

Подача, допускаемая прочностью заготовки (рис. 28.2).

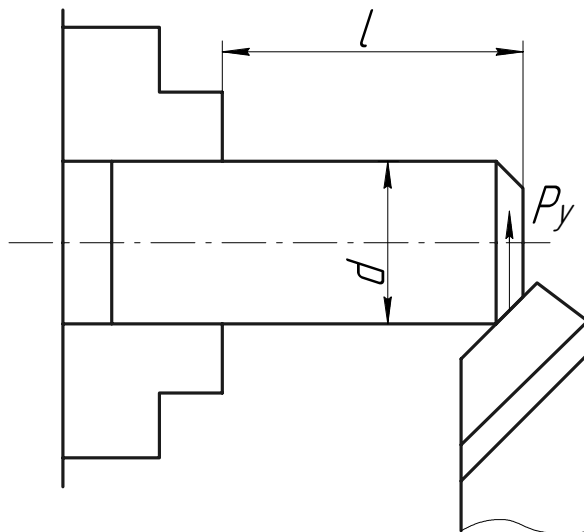


Рис. 28.2. Схема для расчета подачи, допускаемой прочностью заготовки, установленной в патроне

Этот расчет производится для особо тонких деталей ($L / d > 10$).
 Расчетное условие:

$$M_{из} \leq [M_{из}] ,$$

где $M_{из} = kP_y l \rightarrow$ – изгибающий момент в опасном сечении от действия силы P_y ;

$[M_{из}] = [\sigma]_u \cdot 0,1 \cdot d^3$ – допускаемый изгибающий момент;

k – коэффициент, учитывающий способ закрепления обрабатываемой заготовки на станке;

$k = 1$ – заготовка крепится в патроне;

$k = 3/16$ – заготовка крепится в патроне и поддерживается центром задней бабки;

$k = 1/4$ – заготовка обрабатывается в центрах станка.

Тогда

$$S_4 \leq y_{py} \sqrt{\frac{[\sigma]_u \cdot 0,1 \cdot d^3}{l_{py} \cdot t^{x_{py}} \cdot k_{vy} \cdot k_{py} \cdot k \cdot l_{py}}} . \quad (28.5)$$

Подача, допускаемая жесткостью изделия (рис. 28.3).

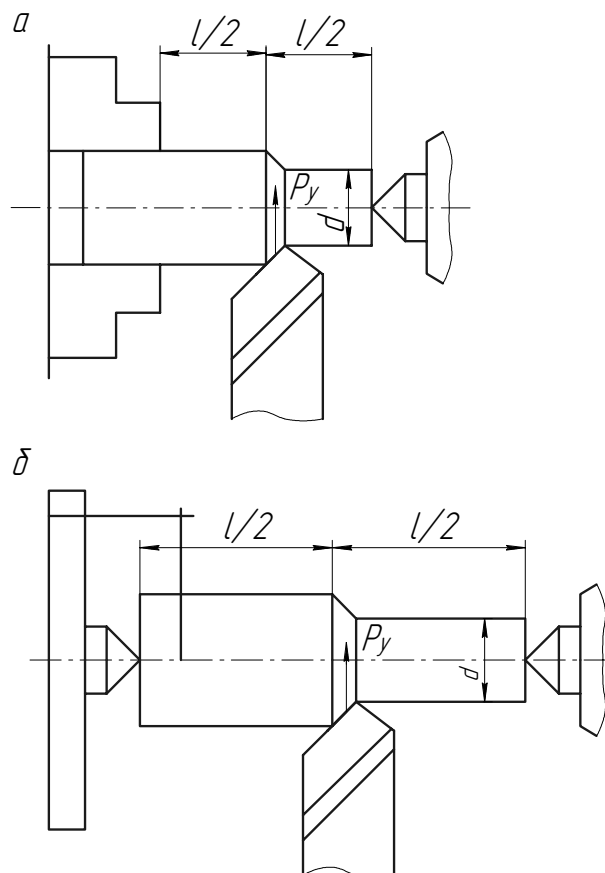


Рис. 28.3. Схема для расчета подачи допускаемой прочностью заготовки установленной в патроне и центре (а), в центрах (б)

Этот расчет производится при отношениях $\frac{L}{d} \geq 8 \dots 10$. Подача определяется из условия максимально допустимой стрелы прогиба:

$$f \leq [f];$$

$$\frac{P_y \cdot l^3}{kEI} \leq [f],$$

где k – коэффициент, учитывающий способ закрепления заготовки на станке.

Если данная операция предшествует токарной чистовой операции, то $[f] = 0,1 \dots 0,2$ мм. Если операция является окончательной, то $[f]$ должен быть увязан с допуском δ на точность изготовления:

$$[f] = \left(\frac{1}{7} \dots \frac{1}{8} \right) \delta.$$

Тогда

$$S_5 \leq y_{py} \sqrt{\frac{0,05kEd^4 [f]}{C_{py} \cdot t^{x_{py}} \cdot k_{vy} \cdot k_{py} \cdot l^3}}. \quad (28.6)$$

Подача, допускаемая шероховатостью обработанной поверхности детали.

Расчетное условие:

$$h \leq R_z$$

– для острозаточенного резца:

$$S_6 \leq R_z \frac{tg\varphi + tg\varphi_1}{tg\varphi \cdot tg\varphi_1}; \quad (28.7)$$

– для резца с радиусом при вершине:

$$S_6 \leq \sqrt{8r \cdot R_z}. \quad (28.8)$$

Из полученных шести значений подач выбирается наименьшее и согласовывается с паспортом станка. Эта подача S_0 будет являться наибольшей технологически допускаемой подачей.

Выбор скорости резания.

Скорость резания определяется исходя из заданной стойкости инструмента T и мощности на шпинделе станка N .

По стойкости инструмента

$$T_1 > T,$$

$$v_1 = \frac{C_v}{T^m t^{x_{yv}} S_0^{y_v}} \cdot k_v; \quad (28.9)$$

$$n_1 = \frac{1000 \cdot C_v}{\pi d T^m t^{x_{yv}} \cdot S_0^{y_v}} \cdot k_v. \quad (28.10)$$

По мощности на шпинделе

$$N_{рез} < N;$$

$$N_{рез} = \frac{P_z \cdot v}{60 \cdot 10^2} \text{ кВт};$$

$$M_{кр} = 716200 \cdot 1,36 \cdot \frac{N}{n} \text{ кг} \cdot \text{мм};$$

$$M_{рез} = \frac{P_z \cdot d}{2} \text{ кг} \cdot \text{мм};$$

$$n_2 = \frac{716200 \cdot 1,36 \cdot 2N}{C_{pz} \cdot t^{x_{pz}} \cdot S_0^{y_{pz}} \cdot k_{vz} \cdot k_{pz} \cdot d}. \quad (28.11)$$

Из двух значений частот вращения n_1 и n_2 меньшее значение является лимитирующим, согласовывается с паспортом станка и используется в дальнейшем при обработке заготовок.

Расчет режима резания при многоинструментальной обработке

Примерами многоинструментальной обработки могут служить работы, выполняемая на токарных автоматах и полуавтоматах, обработка отверстий с помощью многошпиндельных сверлильных головок, одновременное фрезерование нескольких поверхностей набором фрез на одно- или многошпиндельных фрезерных станках и т. д.

Выбор наивыгоднейшего режима резания при многоинструментальной обработке представляет сложную задачу, т. к. наряду с учетом особенностей работы каждого отдельного инструмента требуется общий анализ всей наладки, т. е. всей совокупности инструментов, используемых на станке, и распределения между ними работы резания, необходимой для выполнения данной операции.

Общие принципы расчета режима резания при многоинструментальной обработке аналогичны расчетам при одноинструментальной обработке.

На практике используют упрощенные методы расчета режима резания для многоинструментальных наладок, которые основаны на следующем. Обычно в наладке имеется небольшое количество инструментов с самой низкой стойкостью, а у некоторых малонагруженных инструментов стойкость очень велика. Инструмент, для которого стойкость, выраженная в количестве деталей, обработанных до затупления, будет наименьшей, называется *лимитирующим*. Поэтому в основу может быть положен расчет по лимитирующему инструменту. Это означает, что для данной наладки

сначала устанавливают лимитирующий инструмент, затем для этого инструмента назначают наивыгоднейшую скорость резания, обеспечивающую ему достаточно высокую стойкость, и по ней рассчитывают необходимый режим работы станка.

Наивыгоднейший период стойкости лимитирующего инструмента, выраженный в минутах машинного времени, должен быть значительно больше, чем для условий одноинструментальной работы. При установлении значения его величины учитывается сложность наладки и количество входящих в нее инструментов.

Расчет режима резания при обработке на автоматических линиях и агрегатных станках

Характерной особенностью агрегатных станков и автоматических линий является то, что режим резания в этом случае устанавливается при их проектировании. При эксплуатации могут быть внесены лишь некоторые коррективы к режимам, принятым при проектировании. Также отличаются условия эксплуатации режущего инструмента на универсальных и автоматических линиях. В последнем случае непрерывное наблюдение за работой и состоянием каждого из многочисленных инструментов невозможно. Важное значение приобретает устойчивая работа всех одновременно работающих инструментов в период между двумя смежными моментами их групповой замены.

Оказывается, что расчет режима резания для автоматических линий, исходя из выбранного периода стойкости, не приводит к оптимальным условиям обработки. В существующей методике мало внимания уделяется количеству деталей, которое может быть обработано инструментом за период его стойкости. Это количество деталей в условиях работы автоматических линий имеет особо важное значение, т. к. оно определяет период времени между групповой сменой инструмента и связанные с этим простои. Количество деталей, обработанных за период стойкости T :

$$k = \frac{1000 \cdot S T}{f}, \quad (28.12)$$

где f – площадь обработанной поверхности детали.

Оптимизация режима резания методом линейного программирования

Применение ЭВМ позволяет определить оптимальные элементы режима резания с минимальной затратой времени. Методика расчета элементов режима резания включает создание математической модели, описы-

вающей закономерности процесса резания, и составление уравнений технических ограничений и оптимизации.

Для построения математической модели процесса резания, например, точения, и использования метода линейного программирования необходимо все неравенства технических ограничений и уравнение целевой функции (28.1)...(28.12) преобразовать в линейные формы. С целью исключения возможности появления отрицательных логарифмов, значения S во всех уравнениях и неравенствах умножаются на 100. После логарифмирования левых и правых частей уравнений и неравенств получаем:

$$\ln n + y_v \ln S \leq \ln \left(\frac{318 C_v}{T^m t^{x_v} D} K_v \right), \quad (28.13)$$

$$(1 + z_{p_z}) \ln n + y_{p_z} \ln S \leq \ln \left[\frac{6120 \cdot 1000^{1+z_{p_z}} N_9 \eta}{C_{p_z} (\pi D)^{1+z_{p_z}} K_{p_z}} \right], \quad (28.14)$$

$$\ln n + \ln S \geq \ln \left(\frac{L_{px} R}{60 K_3 r_d - T_{BH} R} \right), \quad (28.15)$$

$$\ln n \geq \ln n_{\text{ст min}}, \quad (28.16)$$

$$\ln n \leq \ln n_{\text{ст max}}, \quad (28.17)$$

$$z_{p_z} \ln n + y_{p_z} \ln S \leq \ln \left[\frac{1000^{z_{p_z}} B H^2 [\sigma_n]}{6 C_{p_z} t^{x_{p_z}} (\pi D)^{z_{p_z}} l_p K_{p_z}} \right], \quad (28.18)$$

$$z_{p_z} \ln n + y_{p_z} \ln S \leq \ln \left[\frac{1000^{z_{p_z}} E_p f_p B H^3}{4 C_{p_z} t^{x_{p_z}} (\pi D)^{z_{p_z}} l_p^3 K_{p_z}} \right], \quad (28.19)$$

$$z_{p_y} \ln n + y_{p_y} \ln S \leq \ln \left[\frac{0,05 \cdot 1000^{z_{p_y}} A f_3 E_3 D^{4-z_{p_y}}}{C_{p_y} t^{x_{p_y}} \pi^{z_{p_y}} L_p^3 K_{p_y}} \right], \quad (28.20)$$

$$z_{p_y} \ln n + y_{p_y} \ln S \leq \ln \left[\frac{0,05 \cdot 1000^{z_{p_y}} A f_3 E_3 D^{4-z_{p_y}}}{C_{p_y} t^{x_{p_y}} \pi^{z_{p_y}} L_p^3 K_{p_y}} \right], \quad (28.21)$$

$$z_{p_z} \ln n + y_{p_z} \ln S \leq \ln \left[\frac{34 \cdot 1000^{z_{p_z}} g^{1,25} \left(\frac{\sin 60^\circ}{\sin \varphi} \right)^{0,8} t^{0,77-x_{p_z}}}{C_{p_z} (\pi D)^{n_{p_z}} K_{p_z}} \right], \quad (28.22)$$

$$z_{p_z} \ln n + y_{p_z} \ln S \leq \ln \left[\frac{1000^{z_{p_z}} Q}{0,4 C_{p_z} t^{x_{p_z}} (\pi D)^{z_{p_z}} K_{p_z}} \right], \quad (28.23)$$

$$\ln S \leq \ln \left(\frac{C_H R_z^y r^u}{t^x \varphi^z \varphi_1^z} \right), \quad (28.24)$$

$$\ln(100S) \geq \ln(100S_{\text{ст min}}), \quad (28.25)$$

$$\ln(100S) \leq \ln(100S_{\text{ст max}}), \quad (28.26)$$

Целевая функция:

$$\ln f = -\ln n - \ln S \quad (28.27)$$

Принимаем $\ln f = X_1$; $\ln S = X_2$; $\ln f = f_0$. Обозначая коэффициенты при X_1 в k -том неравенстве через a_{1k} , коэффициенты при X_2 – через a_{2k} и правые части неравенства – через b_k , получаем математическую модель процесса резания, например, точения, состоящую из линейной целевой функции и системы линейных неравенств

$$\left. \begin{aligned} a_{11}X_1 + a_{21}X_2 &\leq b_1; \\ a_{12}X_1 + a_{22}X_2 &\leq b_2; \\ a_{13}X_1 + a_{23}X_2 &\geq b_3; \\ a_{14}X_1 + a_{24}X_2 &\geq b_4; \\ a_{15}X_1 + a_{25}X_2 &\leq b_5; \\ a_{16}X_1 + a_{26}X_2 &\leq b_6; \\ a_{17}X_1 + a_{27}X_2 &\leq b_7; \\ a_{18}X_1 + a_{28}X_2 &\leq b_8; \\ a_{19}X_1 + a_{29}X_2 &\leq b_9; \\ a_{110}X_1 + a_{210}X_2 &\leq b_{10}; \\ a_{111}X_1 + a_{211}X_2 &\leq b_{11}; \\ a_{112}X_1 + a_{212}X_2 &\geq b_{12}; \\ a_{113}X_1 + a_{213}X_2 &\leq b_{13} \\ f_0 &= (-X_1 - X_2)_{\text{max}} \end{aligned} \right\}. \quad (28.28)$$

Определение оптимального режима резания сводится к тому, чтобы среди возможных неотрицательных решений системы (28.28) найти такие $X_{1\text{опт}}$ и $X_{2\text{опт}}$, при которых линейная функция принимает наибольшее значение.

Установим геометрический смысл математической модели процесса точения. Для этого введём систему координат X_1OX_2 (рис. 28.4). Каждому линейному неравенству геометрически соответствует прямая линия на плоскости X_1OX_2 . Чтобы не усложнять рисунок, на нем изображены не все линии, соответствующие математической модели.

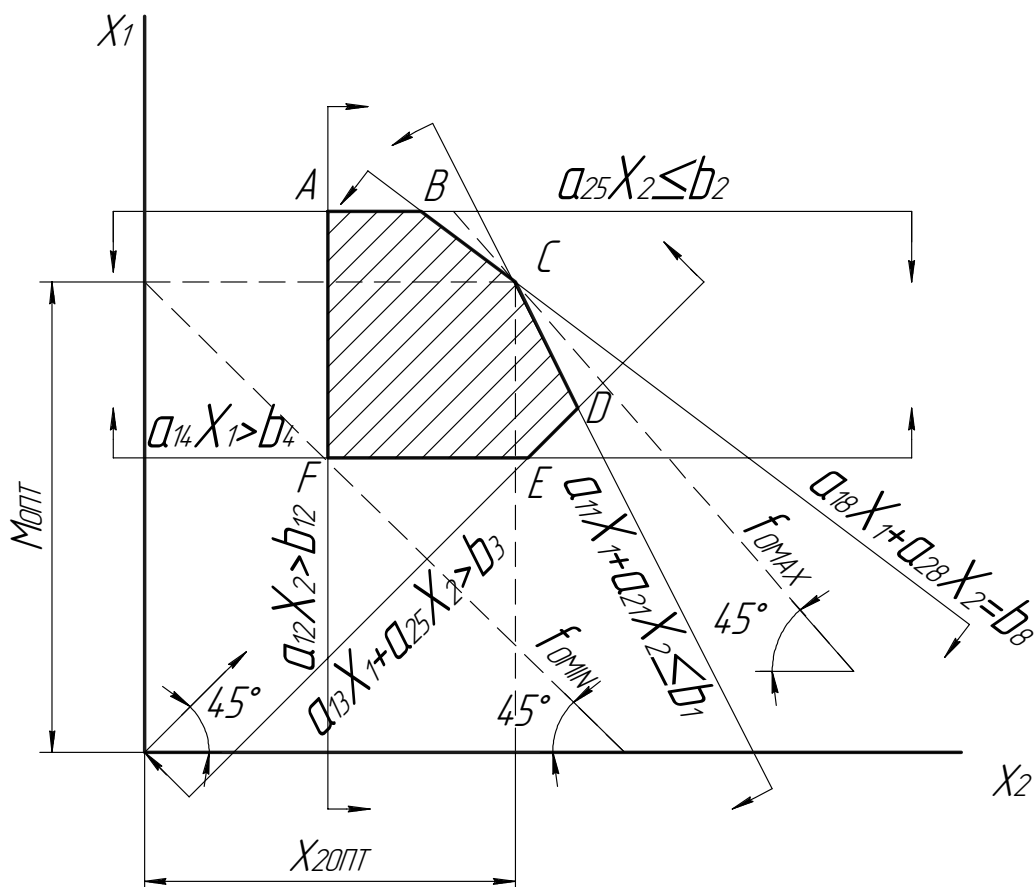


Рис. 28.4. Геометрическая интерпретация модели линейной оптимизации процесса резания

Каждая из прямых делит плоскость X_1OX_2 на две полуплоскости. Координаты точек одной из этих полуплоскостей удовлетворяют соответствующему неравенству, а другой – не удовлетворяют. Следовательно, каждому из неравенств соответствует полуплоскость плоскости X_1OX_2 , отмеченная на рис. 28.4 стрелками. Системе неравенств (28.28) соответствует та часть плоскости X_1OX_2 , которая принадлежит всем указанным полуплоскостям (на рис. 28.4 выделена штриховкой). Эта часть плоскости представляет собой выпуклый замкнутый многоугольник, координаты вершин которого являются корнями совместного решения неравенств системы (28.28).

Зависимость, подлежащая оптимизации, показана прямой линией, расположенной под углом 45° к осям координат.

Линейная функция $f_0 = X_1 + X_2$ будет максимальной в том случае, когда прямая линия, соответствующая ей, займёт положение, при котором расстояние от начала координат по перпендикуляру к ней будет наибольшим. Максимум будет достигнут, когда указанная линия пройдет через точку C многоугольника решений. 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, определяют оптимальные значения элементов режима резания:

$$\begin{aligned}n_{onm} &= e^{X_{1onm}}; \\S_{onm} &= e^{X_{2onm}}.\end{aligned}\tag{28.29}$$

Если система неравенств (28.28) является несовместной, то это означает, что не учтены реальные возможности станка, инструмента и т. п. Для того чтобы привести систему к совместному виду, необходимо осуществить технологические, конструктивные или организационные мероприятия.

Учебное издание

ПОПОК Николай Николаевич

ТЕОРИЯ РЕЗАНИЯ
КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ
для студентов машиностроительных специальностей

В двух частях

Часть 2

ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ, ИЗНАШИВАНИЕ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА,
КАЧЕСТВО ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ,
КОМБИНИРОВАННЫЕ ВИДЫ ОБРАБОТКИ,
ОПТИМИЗАЦИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
СИСТЕМЫ РЕЗАНИЯ

Редактор Ю.М. Казакевич

Подписано в печать 18.04.05. Формат 60×84 1/16. Гарнитура Таймс. Бумага офсетная.
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 6,73. Уч.-изд. л. 6,23. Тираж 100. Заказ

Издатель и полиграфическое исполнение
Учреждение образования «Полоцкий государственный университет»

ЛИ 02330/0133020 от 30.04.04 ЛП № 02330/0133128 от 27.05.04
211440, г. Новополоцк, ул. Блохина, 29