Раздел 5. Основы размерной обработки заготовок деталей машин

Задачи и способы размерной обработки. Эксплуатационные свойства машин и механизмов в значительной мере определяются точностью изготовления деталей, качеством их рабочих поверхностей. Под точностью изготовления понимают отклонение фактических геометрических размеров и формы поверхности (неплоскостность, конусообразность, перекос и неперпендикулярность осей и т. д.) от предельных значений, указанных в рабочих чертежах. Качество поверхности характеризуется ее шероховатостью, величиной и знаком остаточных напряжений в поверхностном слое, ее структурой и химическим составом. Требования точности и качества назначает конструктор на основе эксплуатационных требований к детали и рекомендаций ГОСТа. Несоблюдение заданных требований точности и качества детали в процессе ее изготовления может стать причиной снижения эксплуатационных свойств, надежности машин и их преждевременного выхода из строя.

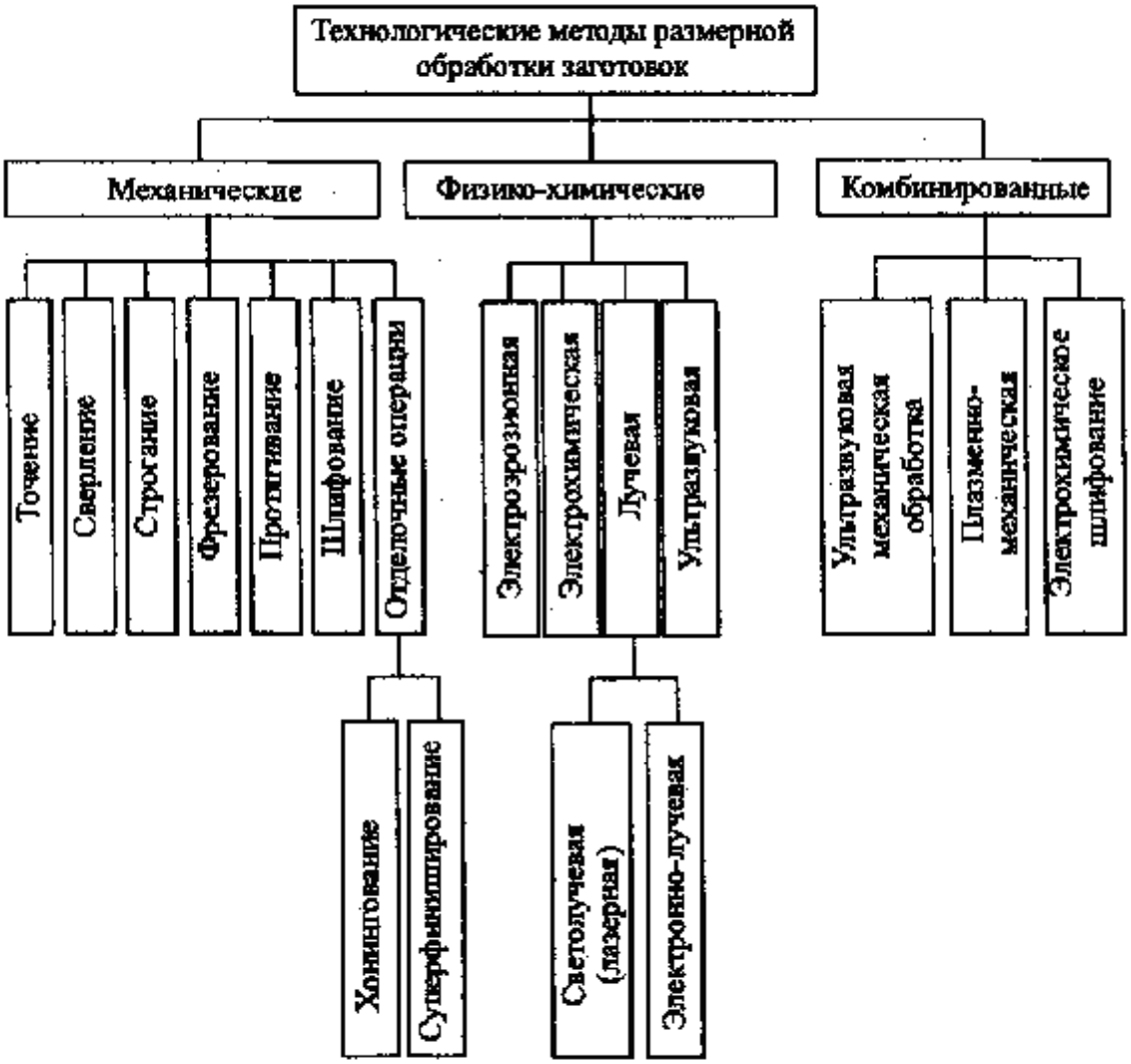
Рассмотренные в предыдущих разделах высокопроизводительные и экономичные способы формообразования деталей методами литья, обработки давлением и способы с применением сварки по своим технологическим возможностям не в состоянии обеспечить заданную точность, необходимую для изготовления большинства деталей машин и механизмов. Поэтому полученные указанными методами изделия используются в качестве заготовок. Эти заготовки изготавливают несколько больших размеров с технологическим припуском. Наличие припуска позволяет методами размерной обработки получать деталь требуемой точности путем управляемого съема металла припуска. Чем точнее изготовлена заготовка, тем меньше требуемая величина припуска и тем ниже трудоемкость последующей размерной обработки заготовки. Многообразие используемых в современных конструкциях деталей различного типоразмера и материала требует применения эффективных способов размерной обработки.

Все способы размерной обработки деталей классифицируют по виду используемой энергии на механические, физико-химические и комбинированные.

Рассматриваемые в настоящем разделе основные способы размерной обработки нашли широкое применение при изготовлении изделий машиностроения и приборостроения (см. схему).

Задачей всех способов размерной обработки является получение деталей требуемых размеров, формы и качества поверхностей, отвечающих требованиям чертежа с максимальной производительностью.

Схема технологических методов размерной обработки деталей машин



Глава 31. Основы механической обработки резанием

Обработка резанием является универсальным методом размерной обработки. Метод позволяет обрабатывать поверхности деталей различной формы и размеров с высокой точностью из наиболее используемых конструкционных материалов. Он обладает малой энергоемкостью и высокой производительностью. Вследствие этого обработка резанием является основным, наиболее используемым в промышленности процессом размерной обработки деталей.

31.1. Сущность и схемы способов обработки

Обработка резанием — это процесс получения детали требуемой геометрической формы, точности размеров, взаиморасположения и шероховатости поверхностей за счет механического срезания с поверхностей заготовки режущим инструментом материала технологического припуска в виде стружки (рис. 31.1).

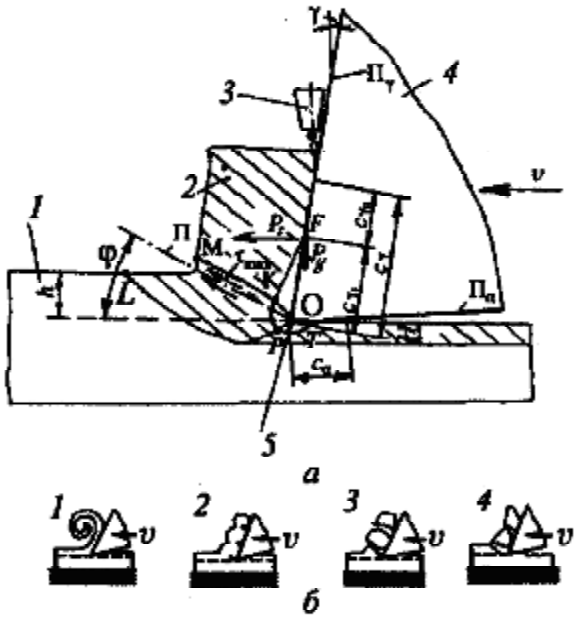


Рис 31.1. Условная схема процесса резания: *а* — *1* —обрабатываемый материал; *2*— стружка; *3* — подача смазочно-охлаждающих средств; *4* — режущий клин; 5 — режущая кромка, φ — угол сдвига, характеризующий положение условной плоскости сдвига (П) относительно плоскости резания; γ — главный передний угол режущего клина; P_z—сила резания; P_y— сила нормального давления инструмента на материал; $C_{тП}$. $C_{тI}$—длины пластического н упругого контактов; C_γ .*Ca* — длина зон контактного взаимодействия по передней (П,) и задней (По) поверхностям инструмента; LOM — область главного упругопластического деформирования при стружкообразовании; FKPT — область вторичной контактной упругопластической деформации металла; *h* — глубина резания; *υ* — скорость резания; *H* — толщина зоны пластического деформирования (наклепа) металла;

б — типы стружек: *1*— сливная; *2* — суставчатая; 3— элементная; 4—надлома

Основным режущим элементом любого инструмента является режущий клин (рис. 31.1, *а*). Его твердость и прочность должны существенно превосходить твердость и прочность обрабатываемого материала, обеспечивая его режущие свойства. К инструменту прикладывается усилие резания, равное силе сопротивления материала резанию, и сообщается перемещение относительно заготовки со скоростью υ. Под действием приложенного усилия режущий клин врезается в заготовку и, разрушая обрабатываемый материал, срезает с поверхности заготовки стружку. Стружка образуется в результате интенсивной

упругопластической деформации сжатия материала, приводящей к его разрушению у режущей кромки, и сдвигу в зоне действия максимальных касательных напряжений под углом φ. Величина φ зависит от параметров резания и свойств обрабатываемого материала. Она составляет ~30° к направлению движения резца.

Внешний вид стружки характеризует процессы деформирования и разрушения материала, происходящие при резании. Различают четыре возможных типа образующихся стружек: сливная, суставчатая, элементная и стружка надлома (рис. 31.1,6).

В процессе клин, испытывая интенсивное трение, контактирует с материалом стружки и обработанной поверхностью в контактных зонах. Для снижения сил трения и нагрева инструмента применяют принудительное охлаждение зоны резания смазочно-охлаждающими средами (СОС), подавая их в зону резания специальными устройствами.

Детали и инструменты закрепляются в специальных органах станка или приспособлениях. Станок, приспособление, инструмент и деталь образуют силовую систему (СПИД), передающую усилие и движение резания от привода станка $_{\text{режущему}}$ инструменту и детали.

Реальные схемы различных способов обработки резанием, используемый инструмент, а также виды движения инструмента и заготовки в процессе обработки приведены на рис. 31.2.

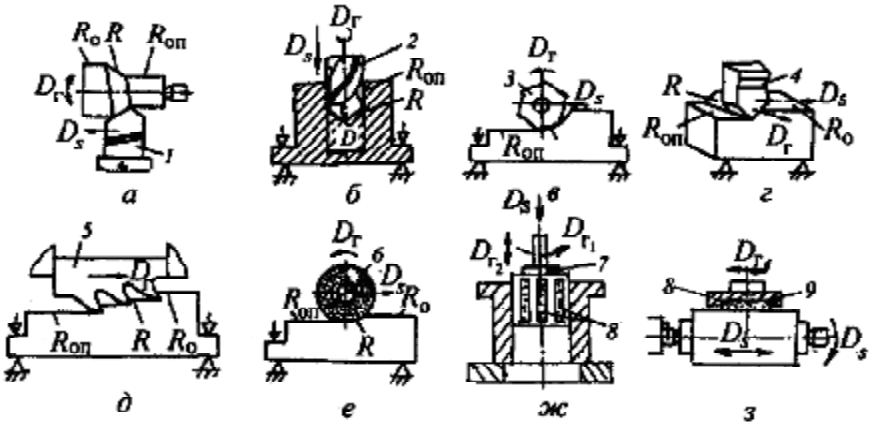


Рис. 31.2. Схемы способов обработки резанием:
а — точение; *б*— сверление; *в* — фрезерование; *г* — строгание; *д* — протягивание; *е* — шлифование; *ж* — хонингование; *з* — суперфиниширование; D_r — главное движение резания; D_s — движение подачи; R_0 — обрабатываемая поверхность; *R*—поверхность резания; $R_{оп}$ — обработанная поверхность; *1*— токарный резец; *2* — сверло; *3* — фреза; *4*—строгальный резец; 5—протяжка; *6*—абразивный круг, 7—хон; *8*—бруски; *9* — головка

В зависимости от используемого типа инструмента способы механической обработки подразделяются на лезвийную и абразивную.

Отличительной особенностью лезвийной обработки является наличие у обрабатываемого инструмента острой режущей кромки определенной геометрической формы, а для абразивной обработки — наличие различным образом ориентированных режущих зерен абразивного инструмента, каждое из которых представляет собой микроклин.

Рассмотрим конструкцию лезвийных инструментов, используемых при резании (рис. 31.3). Инструмент состоит из рабочей части, включающей режущие лезвия, образующие их поверхности, режущие кромки и крепежной части, предназначенной для установки и закрепления в рабочих органах станка.

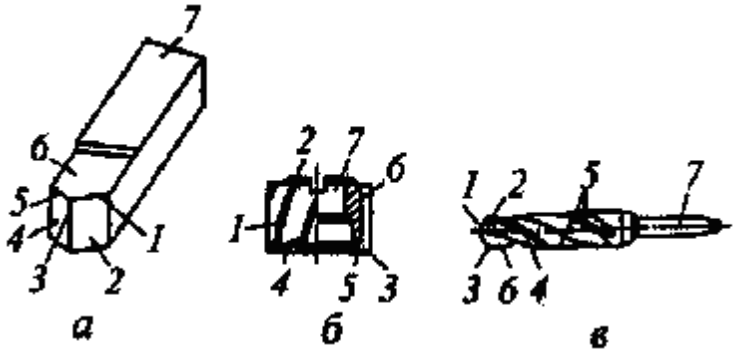


Рис. 31.3. Конструкция и элементы лезвийных режущих инструментов: а — токарного резца; б — фрезы; в — сверла; 1 — главная режущая кромка; 2 — главная задняя поверхность; 3 — вершина лезвия; 4 — вспомогательная задняя поверхность лезвия; 5 — вспомогательная режущая кромка; 6 — передняя поверхность; 7— крепежная часть инструмента

Основными способами лезвийной обработки являются точение, сверление, фрезерование, строгание и протягивание. К абразивной обработке относятся процессы шлифования, хонингования и суперфиниша.

В основу классификации способов механической обработки заложен вид используемого инструмента и кинематика движений (см. схему на с. 556). Так, в качестве инструмента при точении используются токарные резцы, при сверлении — сверла, при фрезеровании — фрезы, при строгании — строгальные резцы, при протягивании — протяжки, при шлифовании — шлифовальные круги, при хонинговании—хоны, а при суперфинише—абразивные бруски.

Любой способ обработки включает два движения (см. рис. 31.2): главное — движение резания D_r — и вспомогательное— движение подачи D_s. Главное движение обеспечивает съем металла, а вспомогательное — подачу в зону обработки следующего необработанного участка заготовки. Эти движения осуществляются за счет перемещения заготовки или инструмента. Поэтому при оценках движение инструмента во всех процессах резания удобно рассматривать при неподвижной заготовке как суммарное (рис. 31.4).

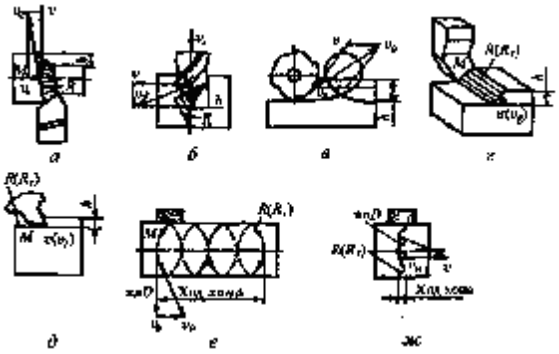


Рис 31.4. Схемы определения максимальной скорости режущей кромки инструмента v_c, формы поверхности резания R и глубины резания h при обработке:
а — точением; *б* — сверлением; *в* — фрезерованием; *г* — строганием; *д* — протягиванием; *е* — хонингованием; *ж*—суперфинишированием.

Тогда полная скорость перемещения ($\overline{u_e}$) произвольной точки M режущей кромки складывается из скорости главного движения (v) и скорости подачи($\overline{u_s}$): $\overline{u_e} = \overline{u} + \overline{u_s}$.

Поверхность резания R представляет собой поверхность, которую описывает режущая кромка или зерно при осуществлении суммарного движения, включающего главное

движение и движение подачи. При точении, сверлении, фрезеровании, шлифовании поверхности резания — пространственные линейчатые, при строгании и протягивании — плоские, совпадающие с поверхностями главного движения; при хонинговании и суперфинишировании они совпадают с поверхностями главного движения.

Поверхности R_0 и $R_{оп}$ называются, соответственно, обрабатываемой поверхностью заготовки и обработанной поверхностью детали (см. рис. 31.2).

В процессах точения, сверления, фрезерования и шлифования главное движение и движение подачи выполняются одновременно, а в процессах строгания, хонингования движение подачи выполняется после главного движения.

31.2. Параметры технологического процесса резания

К основным параметрам режима резания относятся скорость главного движения резания, скорость подачи и глубина резания.

Скорость главного движения резания (или скорость резания) определяется максимальной линейной скоростью главного движения режущей кромки инструмента. Эта скорость выражается в м/с.

Если главное движение резания вращательное, как при точении, сверлении, фрезеровании и шлифовании, то скорость резания будет определяться линейной скоростью главного движения наиболее удаленной от оси вращения точки режущей кромки — максимальной линейной скоростью главного движения (см. рис. 31.4): $\upsilon = \omega D/2$, где D — максимальный диаметр обрабатываемой поверхности заготовки, определяющий положение наиболее удаленной от оси вращения точки режущей кромки, м; ω — угловая скорость, рад/с.

Выразив угловую скорость ω через частоту вращения шпинделя станка, получим: $\upsilon = \pi n D$.

При строгании и протягивании скорость резания v определяется скоростью перемещения строгального резца и протяжки в процессе резания относительно заготовки.

При хонинговании и суперфинишировании скорость резания определяется с учетом осевого перемещения (см. рис. 31.4, *е, ж)* инструмента.

Скорость резания оказывает наибольшее влияние на производительность процесса, стойкость инструмента и качество обработанной поверхности.

Подача инструмента определяется ее скоростью υ_s. В технологических расчетах параметров режима при точении, сверлении, фрезеровании и шлифовании используется понятие подачи на один оборот заготовки S_0 и выражается в мм/об. Подача на оборот численно соответствует перемещению инструмента за время одного оборота: $S_0 = \upsilon_s / n$.

При строгании подача определяется на ход резца. При шлифовании подача может указываться на ход или двойной ход инструмента. Подача на зуб при фрезеровании определяется числом зубьев Z инструмента и подачей на оборот: $S_Z = S_0 / Z$.

Глубина резания h определяется расстоянием по нормали от обработанной поверхности заготовки до обрабатываемой, мм. Глубину резания задают на каждый рабочий ход инструмента. При точении цилиндрической поверхности глубину резания определяют как полуразность диаметров до и после обработки: $h = (D_{заг} - d)/2$, где d — диаметр обработанной поверхности заготовки, мм.

Величина подачи и глубина резания определяют производительность процесса и оказывают большое влияние на качество обрабатываемой поверхности.

К технологическим параметрам процесса относятся геометрия режущего инструмента, силы резания, производительность обработки и стойкость инструмента.

Геометрические параметры режущего инструмента определяются углами, образуемыми пересечением поверхностей лезвия, а также положением поверхностей режущих лезвий относительно обрабатываемой поверхности и направлением главного

движения. Указанные параметры идентичны для различных видов инструмента, что позволяет рассмотреть их на примере резца, используемого при точении.

Углы резца по передним и задним поверхностям измеряют в определенных координатных плоскостях. На рис. 31.5, *а* изображены координатные плоскости при точении, а на рис. 31.5, *б*—углы резца в статике.

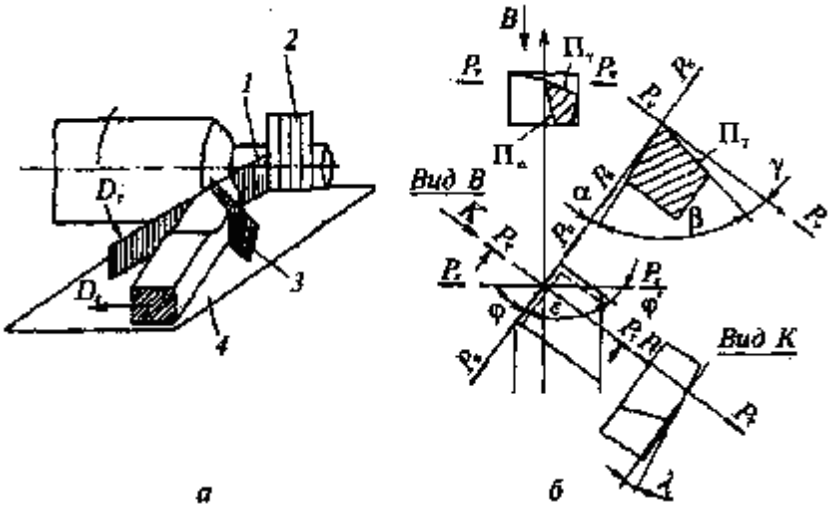


Рис. 31.5. Геометрические параметры токарного резца:
а — координатные плоскости; *б* — углы резца в статике; *1* — плоскость резания P_n; *2* — рабочая плоскость P_s; *3* — главная секущая плоскость $P\tau$; *4* — основная плоскость P_v,

Главный передний угол γ— угол между передней поверхностью лезвия и плоскостью, перпендикулярной к плоскости резания; главный задний угол α— угол между задней поверхностью лезвия и плоскостью резания; угол заострения β — угол между передней и задней поверхностями. Из принципа! построения углов следует, что α + β+ γ= π/2.

Угол наклона режущей кромки *λ* — угол в плоскости резания между режущей кромкой и основной плоскостью.

Углы в плане: главный угол в плане φ — угол в основной плоскости между следом плоскости резания и направлением продольной подачи; вспомогательный угол в плане φ' — угол в основной плоскости между вспомогательной режущей кромкой и обработанной поверхностью.

Геометрические параметры режущего инструмента оказывают существенное влияние на усилие резания, качество поверхности и износ инструмента. Так, с увеличением угла γ инструмент легче врезается в материал, снижаются силы резания, улучшается качество поверхности, но повышается износ инструмента. Наличие угла α снижает трение инструмента о поверхность резания, уменьшая его износ, но чрезмерное его увеличение ослабляет режущую кромку, способствуя ее разрушению при ударных нагрузках.

Параметры, характеризующие стойкость инструмента, рассматриваются в §31.6.

Силы резания P представляют собой силы, действующие на режущий инструмент в процессе упругопластической деформации и разрушения срезаемой стружки.

Силы резания приводят к вершине лезвия или к точке режущей кромки и раскладывают по координатным осям прямоугольной системы координат *xyz* (рис. 31.6).

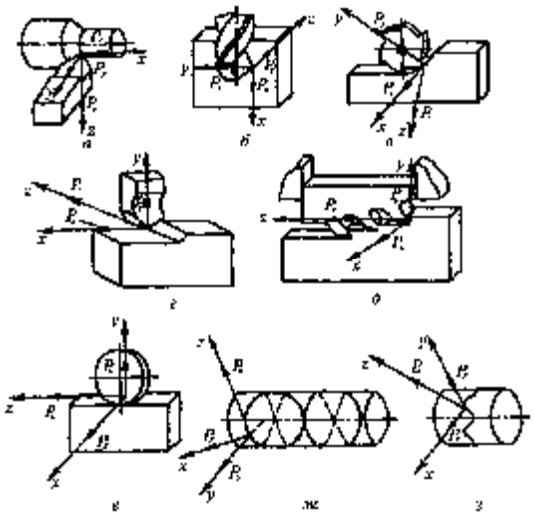


Рис. 31.6. Схема действия сил резания на режущую кромку инструмента в точке, имеющую максимальную скорость перемещения υ_e, при обработке: *а* — точением; *б*— сверлением; *в* — фрезерованием; *г* — строганием; *д* — протягиванием; е — шлифованием; *ж*—хонингованием; *з* — суперфинишированием

В этой системе координат ось *z* направлена по скорости главного движения и ее положительное направление соответствует направлению действия обрабатываемого материала на инструмент. Ось *y* направлена по радиусу окружности главного движения вершины. Ее положительное направление также соответствует направлению действия металла на инструмент. Направление оси *x* выбирается из условия образования правой системы координат. Значение усилия резания определяется несколькими факторами. Оно растет с увеличением глубины *h* резания и скорости подачи *s* (сечения срезаемой стружки), скорости резания *v*, снижением переднего угла у режущего инструмента. Поэтому расчет усилия резания производится по эмпирическим формулам, установленным для каждого способа обработки (см. справочники по обработке резанием). Например, для строгания эта формула имеет вид $P_z = C_p h^{Xp} s^{Yp} X^n$, где коэффициенты C_p, Xp, Yp, n характеризуют материал заготовки, резца и вид обработки.

Мощность процесса резания определяется скалярным произведением: $N = \overline{pu_e}$. Выразив это произведение через проекции по координатным осям, получим: $N = P_z\upsilon_z + P_y\upsilon_y + P_x\upsilon_x$, где υ_x , υ_y, υ_z — проекции на оси координат скорости движения точки приложения равнодействующей сил резания. В практических расчетах используется приближенная зависимость $N = P_z\upsilon$. Это упрощение обусловлено тем, что составляющие P_y и P_x полной силы резания малы по сравнению с P_z, а скорость подачи относительно скорости резания составляет всего 1-0,1%.

Производительность обработки при резании определяется числом деталей, изготовляемых в единицу времени: $Q = 1/T_{шт}$. Время изго товления одной детали равно $T_{шт} = T_0 + T_{ин} + T_{всп}$, где T_0 — машинное время обработки, затрачиваемое на процесс резания, определяется для каждого технологического способа; $T_{ин}$ — время подвода и отвода инструмента при обработке одной детали; $T_{всп}$ — вспомогательное время установки и настройки инструмента.

Таким образом, производительность обработки резанием в первую очередь определяется машинным временем T_0. При токарной обработке, мин: $T_0 = La/(ns_0h)$, где L — расчетная длина хода резца, мм; a — величина припуска на обработку, мм.

Отношение a/h характеризует требуемое число проходов инструмента при обработке с глубиной резания h. Поэтому наибольшая производительность будет при обработке с глубиной резания $h = a$, наибольшей подачей s_0

и максимальной скоростью резания. Однако при увеличении производительности снижается качество поверхности и повышается износ инструмента. Поэтому при обработке резанием решается задача по установлению максимально допустимой производительности при сохранении требуемого качества поверхности и стойкости инструмента.

31.3. Физико-химические и механические основы процесса резания

Среди физико-химических процессов, определяющих процесс резания, основное значение имеет процесс пластической деформации при образовании стружки. От характера пластической деформации, деформационного упрочнения и разрушения металла при стружкообразовании зависят точность обработки деталей и качество поверхностного слоя. Параллельно со стружкообразованием при резании протекают процессы контактного взаимодействия инструмента со стружкой и обработанной поверхностью, сопровождаемые интенсивным тепловыделением, трением, адгезионным взаимодействием обрабатываемого материала и инструмента. Явления, сопровождающие контактное взаимодействие, существенно влияют на свойства обработанной поверхности, определяют стойкость инструмента и устойчивость процесса резания. Современная теория резания рассматривает процессы стружкообразования, контактных взаимодействий и формирования поверхности детали как единый процесс разрушения и деформирования металла.

На процесс резания, точность и производительность обработки существенное влияние оказывают свойства материала, геометрическая форма и исходная точность поставляемых на обработку заготовок.

Из сопутствующих резанию явлений важнейшее практическое значение имеет износ инструмента, непосредственно влияющий на качество и производительность обработки.

Все происходящие процессы и явления взаимосвязаны и составляют основу технологии обработки резанием. Поэтому рассмотрим их более подробно.

Процессу стружкообразования, как взаимосвязанному процессу пластического деформирования и разрушения, присущ ряд специфических особенностей: высокие значения действующих напряжений и их неоднородное распределение в деформируемой зоне; высокая скорость деформации — 10^3—10^6 с; упрочнение металла и его разупрочнение в результате интенсивного тепловыделения в зоне обработки.

Упростим рассмотрение процесса деформации и разрушений обрабатываемого металла, используя только дислокационный механизм пластической деформации, опуская механизм деформации двойникованием, зернограничным проскальзыванием и фрагментацией.

При силовом воздействии режущего клина на поверхности контакта с инструментом в обрабатываемом материале возникают сжимающие напряжения и зарождаются дислокации. Образовавшиеся дислокации перемещаются в глубь металла, размножаются и группируются в полосы скольжения. Скорость распространения дислокационных полос, а следовательно, и скорость пластической деформации пропорциональны действующему напряжению. Так как зерна и плоскость скольжения в каждом зерне ориентированы случайным образом, то картина полос скольжения отражает преимущественное направление действующих сил.

Наибольшее силовое давление со стороны инструмента металл испытывает в направлении скорости резания, меньшую — в глубину заготовки. Соответственно, максимальное значение скорость дислокаций и пластической деформации обеспечивается в направлении скорости резания. Перемещаясь за время деформирования 10^{-2}—10^{-3} с от режущей кромки дислокации, определяют конфигурацию и размеры пластически деформированной зоны (см. рис. 31.1, *а)*. В пластически деформируемой зоне условно

выделяют следующие области: область опережающего упрочнения обрабатываемого материала впереди режущего клина и область упрочнения ниже плоскости резания.

С увеличением пластичности металла и усилия резания размеры пластически деформируемой зоны при обработке растут. В случае обработки легированных малопластичных материалов упрочняющие фазы, легирующие элементы, являются стопорами дислокации. Поэтому размеры зоны деформации при обработке сокращаются, а усилие резания возрастает. Сокращение зоны деформации наблюдается при обработке на высоких скоростях, что, обусловлено превышением скорости резания над скоростью движения дислокационных полос скольжения.

Разность значений действующих напряжений в зоне стружкообразования (см. рис. 31.1, а, *LOM)* предопределяют неоднородность процессов деформации. Материал начинает пластически деформироваться на границе зоны *LO*. По мере приближения деформированного объема к режущей кромке деформация и упрочнение металла возрастают и полностью завершаются на границе зоны *КМ* деформацией сдвига в области максимальных касательных напряжений под углом φ к направлению движения резца. Движение дислокаций в поле напряжений при пластической деформации вызывает последовательный переход атомов в новое положение. В результате атомы приобретают кинетическую энергию и совершают колебания с большей амплитудой около нового положения равновесия. Таким образом, часть работы, затраченной на перемещение дислокаций, превращается в теплоту. В результате при обработке стали 45 температура металла в конце зоны деформации возрастает до 300 °С, не вызывая его температурного разупрочнения.

Деформация металла в пластически деформируемой зоне непосредственно перед режущей кромкой отличается от рассмотренной тем, что здесь в металле развиваются максимальные напряжения, а деформация стеснена. В результате здесь генерируется максимальное число дислокаций и плотность полос скольжения, они не выходят из зоны, а сливаются с дислокациями в пересекающихся плоскостях скольжения, образуя полостную дислокацию, которая представляет собой субмикротрещину. Достигая критического значения, трещина начинает распространяться перед режущей кромкой при ее перемещении, разрушая металл.

Вид разрушения металла и тип образующейся стружки зависят от пластичности обрабатываемого металла, скорости и температуры резания.

Рассмотрим характер разрушения материала и тип образующейся стружки в зависимости от его пластичности при неизменных скорости и температуре резания. При обработке вязких пластичных материалов плотность дислокаций перед режущим лезвием не достигает критических значений, при которых материал, упрочняясь, охрупчивается, поэтому трещина перемещается одновременно с инструментом в плоскости резания. В результате происходит обтекание металлом режущего клина и формируется сливная стружка. Она представляет собой сплошную ленту без разрывов и больших трещин с гладкой прирезцовой стороной. В том случае, если перед режущим лезвием плотность дислокаций достигает критических значений и материал охрупчивается, перед режущим клином образуется несколько микротрещин. В вязких материалах, у которых на развитие трещины необходимо затрачивать работу, развитие получает только трещина, совпадающая с направлением движения инструмента. При этом трещины, имеющие другие направления, не развиваются, образуя на поверхности обработанной детали сетку микротрещин. В этом случае образуются суставчатые стружки в виде ленты с гладкой прирезцовой стороной и трещинами по краям стружки. В обоих случаях процесс стружкообразования не вызывает изменения сил резания.

В том случае, если при обработке перед режущей кромкой образуется магистральная трещина, скорость движения которой выше скорости резания, она выходит на поверхность стружки, вызывая ее отламывание в виде отдельных изогнутых элементов,

такая стружка называется элементной. В этом случае стабильность сил резания нарушается. Формирование элементов стружки сопровождается пульсацией сил резания.

При резании материалов, имеющих хрупкое разрушение, происходит вырывание отдельных частиц, причем образующиеся при этом трещины располагаются как выше, так и ниже плоскости резания. Элементы этой стружки имеют неправильную форму — такой тип стружки называется стружкой надлома. Сила резания при этом постоянно изменяется с высокой частотой.

Таким образом, разрушение материала и отделение стружки происходят в зоне наибольшего предварительного упрочнения и максимальной деформации металла — у вершины режущего лезвия.

Контактное взаимодействие обрабатываемого металла с инструментом при обработке резанием возникает сразу после разрушения металла у вершины режущего лезвия в процессе обтекания металлом передней и задней поверхностей режущего клина. В процессе обтекания формируются контактные области C_α и C_γ, (см. рис. 31.1, *а)*. В контактной области происходит вторичное деформирование металла путем смятия режущей кромкой; интенсивное трение в условиях высокого давления (до 2000 МПа); локальный нагрев до 1000 °С, обусловленный выделением теплоты при трении. В контакт с инструментом вступают только что образовавшиеся в результате разрушения поверхности обрабатываемого металла.

В результате под действием высоких давлений и температур между относительно перемещающимися поверхностями формируются адгезионные связи.

Прилипание металла к инструменту с формированием устойчивой адгезионной связи обусловлено ювенильным состоянием контактирующих поверхностей, высокими значениями давления и температур, характерными для образования соединений при сварке трением. Прилипающий слой металла называют наростом.

Существование *нароста* обеспечивается, если силы адгезии превышают силы сдвига, стремящиеся срезать налипший слой металла при движении стружки. Образующийся вблизи режущей кромки нарост начинает расти по высоте, одновременно упрочняясь. Теперь контакт и трение обрабатываемого металла происходят с наростом, и при увеличении его высоты ухудшаются условия стока теплоты в инструмент. В результате при высоких скоростях обработки резко возрастает температура в зоне контакта, что ведет к сдвигу налипшего упрочненного слоя и уносу его стружкой. Далее процесс повторяется — рост налипшего металла и сдвиг его с уносом стружкой. Частота срыва зависит от скорости резания и при пульсирующей форме своего существования составляет до нескольких сотен в минуту.

При снижении скорости резания процесс сменяется образованием постоянно существующего нароста, так как снижаются рост температур в контактной зоне и действующее усилие сдвига (рис. 31.7).

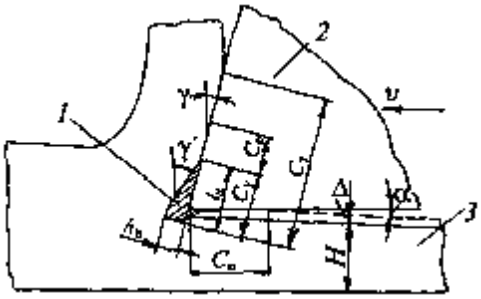


Рис 31.7. Схема образующегося нароста и его влияние на изменения главного переднего угла (γ), а также на погрешность размера детали:
1 — нарост, *2* — режущий клин, *3* — обрабатываемая деталь, Δ — погрешность размера детали *(H)*, обусловленная наростообразованием. $\gamma' > \gamma$ — изменение переднего угла режущего клина; $h_н$, $l_н$ - высота и ширина нароста, C_γ, C_p — зоны упрочнения и разупрочнения металла в пластическом контакте, C_γ, C_α — общая длина контакта по передней и задней поверхности инструмента

Нарост представляет собой сильно деформированный металл высокой твердости. Меняя геометрию режущей кромки (увеличивая главный передний угол инструмента), нарост снижает силу резания; обладая высокой твердостью, в 2 — 3 раза превосходящей твердость обрабатываемого металла, предохраняет инструмент от износа. Отрицательное влияние нароста состоит в том, что он увеличивает шероховатость обработанной поверхности и снижает точность формы детали. Пульсирующая форма нароста недопустима, так как при срыве нароста циклически меняется сила резания, вызывая вибрацию СПИД, и, как следствие, снижается качество поверхности детали, кроме того, частицы нароста повышают износ инструмента.

Явления, происходящие при формировании поверхностного слоя детали ниже плоскости резания, представляют наибольший практический интерес, так как именно они определяют качество и точность поверхности детали.

Свойства поверхностного слоя формируются под действием пластической деформации и нагрева обрабатываемого металла в процессе резания (см. рис. 31.1, а). В зоне опережающего упрочнения перед режущей кромкой инструмента *LOM* в результате первичной пластической деформации происходит наклеп металла. В результате трения и вторичной деформации при контактировании с задней поверхностью (C_a в зоне *OPT)* инструмента материал испытывает деформации растяжения в тонком поверхностном слое, при этом наклеп металла возрастает до ~15%. Сопутствующий нагрев деформированного металла до температур (0,2—0,3) $T_{пл}$ вызывает возврат, а до температур выше 0,4 $T_{пл}$ — рекристаллизацию с разупрочнением упрочненного слоя. Особенно существенное влияние оказывает нагрев при скоростной лезвийной обработке и шлифовании. Нагрев создает предпосылки для процессов взаимной диффузии обрабатываемого н инструментального материалов и химического взаимодействия с элементами смазочно-охлаждающих веществ.

Кроме того, в результате резания на поверхности формируется микрорельеф (след от резца), а также микротрещины, возникающие при хрупком разрушении металла перед режущим клином.

В результате неизбежного при резании физического контакта с инструментом, силового и теплового воздействия в поверхностном слое, возможно формирование следующих свойств: высокой степени наклепа; наличия значительных остаточных напряжений растяжения, значение которых может достигать 0,8 $\sigma_в$; структуры, отличной от структуры обрабатываемого металла; содержания в металле поверхностного слоя химических элементов материала инструмента и охлаждающей среды.

Современная технология обработки резанием позволяет свести к минимуму нежелательные свойства у обрабатываемой детали, снижающие ее экс-
плуатационные характеристики. Так, снижение наклепа, остаточных напряжений и шероховатости поверхности обеспечивается: регулированием параметров, способствующих снижению сил резания $\{h, s_o, \gamma, \alpha)$; многооперационной обработкой деталей с постепенным снижением сил резания при каждой последующей операции. Эффективным способом снижения структурны изменений и изменений химического состава является использование смазочно-охлаждающих сред. Помимо режима качество поверхности зависит о наследуемых свойств заготовки и вибрации системы СПИД.

31.4. Тепловые процессы в зоне резания и смазочно-охлаждающие среды

Экспериментально установлено, что большая часть работы пластической деформации (до 93%) при резании превращается в теплоту. Зона резания представляет собой сложную систему тепловыделения и терморасределения. В системе участвуют источники теплоты и следующие теплоотводящие объекты: обрабатываемая деталь, резец, стружка, смазочно-охлаждающая среда и окружающее воздушное пространство.

Источником тепловыделения при резании являются: теплота, образующаяся в результате пластического деформирования металла в зоне стружкообразования *(Q_c);* теплота, обусловленная трением стружки о заднюю и переднюю поверхности инструмента *($Q_{кз}$, $Q_{кп}$).*

Одновременно с процессом тепловыделения при резании происходит процесс теплообмена за счет теплопроводности и конвекции.

Тепловой баланс процесса резания выражается следующим тождеством:

$$Q_c + Q_{кп} + Q_{кз} = T_0 + T_и + T_c + K_ж + K_в ,$$

где T_0 , $T_и$ и T_c — теплота, отведенная в обрабатываемую деталь, в инструмент и в стружку; $K_ж$ — конвективный теплообмен с жидкостью; $K_в$ — воздушный теплообмен.

Доля теплоты, отводимая в результате теплообмена, зависит от метода, материала инструмента, режима и условий обработки. Ориентировочные значения отводимой теплоты следующие: стружкой отводится 25—85% выделившейся теплоты, заготовкой — 10—50%, а инструментом — 2—8%. С увеличением скорости резания доля теплоты, отводимой стружкой, возрастает, так как увеличиваются ее объем в единицу времени и температура нагрева.

Явление тепловыделения присуще процессу резания, но отрицательно влияет на стойкость инструмента, точность и качество обработки. Для снижения отрицательного влияния нагрева при механообработке применяют смазочно-охлаждающие среды (СОС). Это жидкости, газы и газообразные вещества и твердые вещества, которые наряду с охлаждением снижают тепловыделение *($Q_{кп}$* и *$Q_{кз}$).* Наибольшее применение получили жидкие среды (СОЖ): эмульсии; мыльные растворы; масла; масла с добавлением фосфора и серы; керосин и др. Газообразные среды — $C0_2$, CCl_4; N_2; пары поверхностно-активных веществ; распыленные жидкости и пены. Твердые среды — порошки парафина, битума и мыльные порошки. Применение смазочно-охлаждающих сред позволяет на 10—15% снизить эффективную мощность резания, повысить стойкость режущего инструмента, увеличить точность и снизить шероховатость обработанной поверхности.

Подача смазочно-охлаждающих сред в зону резания осуществляется различными конструктивно-технологическими способами. Это подача жидкости через узкое сопло на переднюю поверхность инструмента; подача струи жидкости тонкой струей под напором со стороны задних поверхностей инструмента; подача распыленных жидкостей со стороны задних поверхностей инструмента; подвод жидкостей через полый инструмент (чаще всего применяют при сверлении глубоких отверстий). Эффективный отвод $Q_{кп}$ при скоростном резании от участка резца, где формируется нарост, обеспечивается увеличением $T_и$ за счет применения теплопроводных инструментальных материалов. При этом инструмент охлаждается СОС.

31.5. Влияние вибрации системы СПИД и технологической наследственности на качество обработанных поверхностей

Влияние вибрации СПИД на процесс резания определяется их частотой и амплитудой. Так, ультразвуковые колебания частотой 18—20 кГц и амплитудой 8—20 мкм вводят в зону резания для улучшения обработки резанием.

В процессе резания возникают низкочастотные (50—500 Гц) и высокочастотные (800—6000 Гц) автоколебания переменной амплитуды в результате упругих деформаций системы СПИД при изменении сил резания. Изменение сил резания обусловлено непостоянством размера припуска, нестабильностью свойств обрабатываемого материала, образованием наростов, элементных стружек и стружек надлома. Низкочастотные колебания вызывают волнистость поверхности детали, а при высокочастотных колебаниях на поверхности образуется рябь, в обоих случаях шероховатость поверхности возрастает. Автоколебания снижают стойкость инструмента, особенно из твердых сплавов, керамики и сверхтвердых материалов. Возникновение автоколебаний предупреждается: выбором режима резания и геометрических параметров

инструмента; увеличением точности заготовок и обеспечением постоянства припуска; термической обработкой заготовок. Для снижения автоколебаний увеличивают жесткость станка, инструмента и приспособлений, применяют виброгасители.

В общем балансе погрешностей погрешности, обусловленные вибрацией СПИД, составляют до 30%.

Под *технологической наследственностью* понимают сохранение обработанным изделием свойств и погрешностей, присущих обрабатываемой заготовке. Например, при точении разнотолщинной литой заготовки без предварительного выравнивания ее толщины получаем разнотолщинную деталь.

Количественно технологическая наследственность характеризуется коэффициентом наследования, указывающим степень изменения определенного свойства заготовки после обработки. Например, коэффициент изменения шероховатости R^2 после шлифования заготовки, полученной точением и имеющей шероховатость R, будет равен $K_т = R_z^1/R_z^2$, где 1 и 2 — порядковые номера операций.

Технологическая наследственность может улучшать или снижать эксплуатационные свойства. В каждом отдельном случае требуется изучение физических механизмов наследственности для управления ею. Так, наклеп поверхностного слоя жаропрочного сплава после чистовой обработки возрастает, что объясняется суммированием новых дислокаций с имевшимися до обработки. Поэтому, для предотвращения чрезмерного упрочнения поверхности, перед чистовой обработкой необходимо провести термообработку заготовки — снизить влияние технологической наследственности.

31.6. Инструментальные материалы

Основная роль в срезании стружки при обработке резанием отведена инструменту. В процессе обработки он нагревается, испытывает механические нагрузки и контактное трение с обрабатываемым материалом. В системе СПИД (станок — приспособление — инструмент — деталь) инструмент работает в наиболее тяжелых условиях и от него в первую очередь зависят надежность и качество обработки. Для обеспечения работоспособности инструментальные материалы должны обладать высокими значениями: допустимых напряжений на изгиб, растяжение, сжатие, кручение, удар; твердости режущей части инструмента, обеспечивающей его режущие свойства; теплостойкости, т. е. способности сохранять свою твердость при высоких температурах; износостойкости. Промышленность выпускает инструментальные материалы, по составу, свойствам и области применения подразделяющиеся на следующие группы: углеродистые и легированные инструментальные стали; высоколегированные инструментальные (быстрорежущие) стали; твердые сплавы; оксидную, оксидно-нитридную, оксидно-карбидную керамику; сверхтвердые инструментальные материалы на основе алмаза и кубического нитрида бора.

1. Инструментальные стали. К этой группе материалов относят высокоуглеродные заэвтектоидные высококачественные стали с содержанием углерода 0,9—1,3 % — это стали У9А, У10А, У12А, У13А. После термообработки они приобретают твердость HRC 62—64, что позволяет использовать их в качестве режущей части инструмента при обработке основных конструкционных сталей, чугуна в отожженном состоянии (твердостью до HRC 32). Однако их низкая теплостойкость (200—250 °С) допускает обработку при скоростях резания не выше 10—15 м/мин. Эти стали используют для изготовления плашек, напильников, метчиков и другого инструмента, работающего с малыми скоростями резания.

Легирование углеродистых сталей небольшим количеством хрома, марганца, вольфрама и кремния повышает износостойкость углеродистых сталей за счет повышения твердости (HRC 66—67,5) в результате образования сложных карбидов и высокой концентрации углерода в мартенсите, однако легированные стали, так же как и углеродистые, обладают низкой теплостойкостью, поэтому из них изготавливают мелкоразмерные сверла, метчики, концевые фрезы

и протяжки.

2. Быстрорежущие стали обладают высокой прочностью, ударной вязкостью и трещиностойкостью. Теплостойкость быстрорежущих сталей по сравнению с легированными обеспечивается за счет введения вольфрама, молибдена, ванадия и хрома, образующих сложные карбиды, связывающие почти весь углерод стали. Коагуляция карбидов, снижающая теплостойкость сталей, происходит только при 550—700 °С, что существенно повышает теплостойкость быстрорежущих сталей.

Высокую твердость (HRC 63— 65) и прочность (2,5 ГПа) быстрорежущие стали, легированные вольфрамом, хромом и ванадием, приобретают после термической обработки — закалки и многократного отпуска.

По уровню допустимых скоростей резания быстрорежущие стали делят на две группы:

а) обеспечивающие нормальную производительность — это стали Р18, Р12, Р9 (вольфрамовые) с содержанием вольфрама соответственно от 18 до 9% и стали Р6М5, Р8М5 (вольфрамо-молибденовые);

б) обеспечивающие повышенную производительность — это стали Р12Ф3, Р12Ф3М8 (ванадиевые), Р18Ф2К5, Р6М5К5, Р9М5К5 (кобальтовые), В11М7К23, В4М2К23 (с интерметаллидным упрочением).

Инструменты из сталей первой группы имеют универсальное применение, они используются для обработки конструкционных сталей, чугунов с твердостью 200—280 НВ и цветных металлов нормальной обрабатываемости. Из них изготавливают фасонный инструмент (метчики, протяжки, фрезы и сверла) для машинной обработки. Эти стали обладают хорошей шлифуемостью.

Стали второй группы Р6М5К5, Р18М5Ф2, легированные вольфрамом, молибденом, кобальтом и ванадием, применяют для обработки жаропрочных сталей и сплавов, выполнения черновых операций, в том числе фрезерования. Теплостойкость этих сталей составляет 630—640 °С, а теплопроводность в 1,5 раза выше, чем у сталей первой группы. Они способны воспринимать высокий уровень термомеханических нагрузок, возникающих при обработке титановых и жаропрочных сплавов при точении, фрезеровании, строгании.

Однако у всех быстрорежущих сталей твердость и износостойкость резко снижаются с повышением температуры при увеличении скорости резания.

3. Твердые сплавы являются основным инструментальным материалом, обеспечивающим высокопроизводительную обработку резанием. Инструментом из этих сплавов срезается до 65% всей стружки из-за использования скоростей резания, в 2—3 раза превышающих скорости резания, принятые для инструментов из быстрорежущей стали.

Они представляют собой композиционный материал, состоящий из порошков карбидов титана, вольфрама, тантала, карбонитрида титана и связующей фазы — матрицы, в качестве которой используется кобальт—никель—молибден.

Твердые сплавы обладают высокой твердостью (HRC 82—92), которая сохраняется, обеспечивая высокие режущие свойства до 700—1000 °С; высокой прочностью при сжатии, но невысокой прочностью при изгибе и ударной вязкостью. Поэтому инструменты из таких материалов пригодны для] обработки высокопрочных металлов, включая закаленные стали, и неметаллических материалов типа стеклофарфора, пластмасс и др. Недостатком твердых сплавов является их хрупкость.

По составу и области применения твердые сплавы делятся на четыре ос- j новные группы: вольфрамовые (W—Co), титановольфрамовые (WC—TiC—Co), титано-тантало-вольфрамовые (WC—TiC—TaC—Co) и безвольфрамовые (TiC—Ni—Mo, TiCN—Ni—Mo).

Вольфрамо-кобальтовые сплавы (группа ВК) состоят из карбида вольфрама и связующего кобальта в количестве от 3 до 15%. Содержание кобальта в сплаве определяет его вязкость. Наименьшим количеством кобальта и наименьшей вязкостью обладают сплавы ВК2, ВК3, Т30К4 их применяют для срезания тонкой стружки на чистовых операциях. Сплавы типа ВК8, Т14К8, содержащие наибольшее количество кобальта, обладают наибольшей вязкостью. Их применяют на черновых операциях при снятии стружки большого сечения.

На износостойкость сплавов ВК оказывают влияние содержание карбидов WC и размер карбидного зерна. При уменьшении размеров зерен возрастает износостойкость, но несколько снижается прочность. В обозначения марки сплава с мелким зерном добавляется буква М: ВК3-М, ВК6-М.

Инструмент из сплавов ВК в зависимости от своего состава с успехом используется при обработке чугунов, вольфрамовых, молибденовых, никелевых, титановых сплавов, цветных металлов и сплавов повышенной хрупкости, конструкционных полимерных материалов типа пластмасс, угле- и боропластиков, дерева и др. В то же время они не рекомендуются для резания заготовок из высокоуглеродистых и легированных сталей, так как при этом интенсивно изнашиваются зерна карбида вольфрама.

Титано-вольфрамовьге сплавы (группа ТК) по сравнению с со сплавами ВК обладают большей твердостью, тепло- и жаростойкостью, стойкостью к коррозии и окислению, но меньшей теплопроводностью и большей хрупкостью. Сплавы ТК лучше противостоят изнашиванию при обработке сталей, чем сплавы ВК, в то же время прочность удержания зерна карбида в матрице ниже, чем у сплавов ВК. В силу отмеченных отличий инструменты из сплавов ТК применяют при обработке конструкционных сталей на средних и высоких скоростях резания.

Титано-тантало-вольфрамовые сплавы (группа ТТК) состоят из зерен WC, зерен тройных карбидов (Ti, Ta, W) и связующей кобальтовой фазы.

Сплавы ТТК отличаются меньшей хрупкостью, большей прочностью удержания карбидных зерен связкой, лучшей сопротивляемостью высокотемпературной текучести и большим пределом прочности при циклическом характере нагружений, чем сплавы ТК и ВК. Поэтому инструмент, оснащенный режущими пластинами из ТТК, особенно эффективен в процессах прерывистого резания (фрезеровании, строгании, прерывистом точении); для операций черновой обработки с большими сечениями срезаемого слоя и колебаниями припуска. Группа сплавов ТТК применяется при обработке труднообрабатываемых сталей аустенитного класса.

4. Режущая керамика. В настоящее время выпускаются три основных вида керамических инструментальных материалов:

- белая оксидная керамика состоит на 90% из оксида алюминия $A1_20_3$ и легирующих добавок (MgO, Zr_20_2 и др.);
- черная оксидно-карбидная керамика изготавливается из смеси $A1_20_3$ (до 60%), TiC (20—40%), $Zr0_2$ (20—40%) и других карбидов с легирующими добавками;
- керамика на основе нитридов кремния ($S1_3N_4$), легированная оксидами иттрия, циркония и аммония.

Керамические материалы не имеют связующей металлической фазы, что снижает их разупрочнение при перегреве и делает возможным их применение при высоких скоростях резания. Если предельная скорость резания для твердосплавного инструмента составляет 500—600 м/мин, то для керамического инструмента она увеличивается до 900—1000 м/мин. Недостатками керамических материалов являются их низкая прочность при изгибе (0,3— 0,35 ГПа), повышенная хрупкость и низкая теплопроводность.

Высокая термостабильность при температуре до 1400 ^{0}С в сочетании с высокой твердостью и сопротивляемостью окислению обеспечили применение керамического инструмента для чистовой обработки заготовок повышенной твердости и прочности на высоких скоростях резания. Керамический инструмент требует использования оборудования и приспособлений высокой жесткости, исключающих вибрацию инструмента.

5. Сверхтвердые материалы (СТМ). Ими принято называть материалы, имеющие твердость по Виккерсу при 20 °С свыше 35 ГПа. Это пластины на основе поликристаллических алмазов, кубического и гексагонального нитрида бора. На основе нитрида бора широко используется эльбор Р, полученный в виде поликристаллов. По твердости он уступает только алмазу, а его теплостойкость в два раза выше теплостойкости алмаза (~1600 °С).

Для кубического нитрида бора (КНБ) характерны высокая химическая устойчивость, термостабильность при 1450 °С. Однако сравнительно низкая прочность и повышенная хрупкость

КНБ позволяют применять инструмент только для чистовой обработки заготовок из хрупких, твердых материалов при ограниченном сечении срезаемого материала и повышенной жесткости СПИД. Применение инструмента из КНБ для чистовой обработки высокопрочных чугунов, закаленных сталей (HRC > 40) и некоторых сплавов позволяет в 10—20 раз повысить скорость резания этих материалов по сравнению с обработкой твердосплавным инструментом.

СТМ на основе алмаза по технологии производства делятся на две группы: поликристаллы алмаза, получаемые фазовым переходом графита в алмаз и получаемые спеканием алмазных зерен.

К первой группе относятся карбонадо (АСПК) и баллас (АСБ); ко второй группе — СВБН, карбонит и СКМ.

Поликристаллы впаивают или механически закрепляют в инструментах, изготавливая резцы, торцевые фрезы и другие инструменты. Алмазные резцы широко используются при тонком точении или растачивании заготовок из сплавов алюминия, бронз, латуней и неметаллических материалов. Кроме того, они применяются для обработки заготовок из твердых материалов, германия, кремния, полупроводниковых материалов, керамики, жаропрочных сталей и сплавов. Обработку ведут со скоростями резания до 1200 м/мин. Поверхности деталей, обработанные в этих условиях, имеют низкую шероховатость и высокую точность размеров.

31.7. Износ режущего инструмента. Параметры износа

В процессе резания происходит затупление режущей кромки инструмента, снижающее его режущие свойства. При затуплении нарушаются условия стружкообразования, возрастают силы резания, ухудшаются точность обработки и качество обработанной поверхности.

Затупление режущей кромки обусловливается ее износом (рис. 31.8). По механизму затупления режущей кромки условно выделяют следующие виды износа инструмента: макро- и микросколы, пластическая деформация, абразивно-механический, абразивно-химический, адгезионно-усталостный и диффузионный.

Хрупкие микросколы возникают в твердосплавном инструменте из-за попадания в зону обработки крупных частиц повышенной твердости. Это может быть неустойчивая часть нароста или частицы оксидов и формовочных смесей при резании отливок и поковок.

Макросколы режущей кромки возникают под действием изгибающих напряжений, превышающих допустимые, особенно при ударных нагрузках.

Пластическая деформация. В процессе резания инструментами из быстрорежущих и углеродистых сталей наблюдается пластическое деформирование режущего клина, приводящее к опусканию передней и выпучиванию задней поверхности. В результате опускания передней поверхности изменяется передний угол и, соответственно, условия резания (рис. 31.8, *г*).

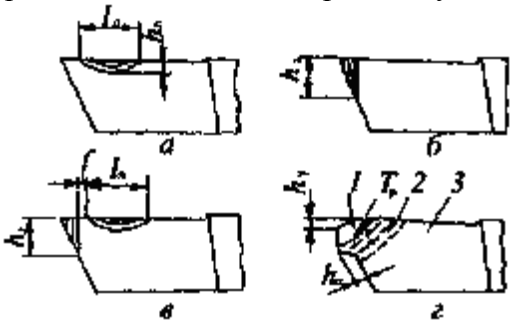


Рис. 31.8. Характер износа режущего клина:
а — износ по передней поверхности; *б* — износ по задней поверхности; в — износ по передней и задней поверхностям; *г* — пластическая деформация; *1,3* — зоны упругой деформации; *2* — зона ползучести; $l_л$ $h_л$ — длина и глубина лунки; *f* — размер фаски; h_γ, h_α — размер опускания передней поверхности и выпучивания по задней поверхности; *hз* — длина площадки износа; Тр—трещина (скол)

Ползучесть и разрушение режущей кромки. Деформирование режущего клина в результате пластической деформации металла происходит в зоне изотерм, которые простираются от передней к задней поверхности инструмента (рис. 31.8, *г)*. По этим изотермам (350—500 °С) и при постоянной нагрузке на инструмент наблюдается процесс ползучести.

В результате ползучести материала в зоне *2* на границе с зонами *1 и 3* накапливаются высокие степени деформаций. Происходит дислокационное упрочнение, вызывающее хрупкое разрушение
твердосплавного инструмента на границе зон *1* и *2*. Длительность работы инструмента до скола увеличивают снижением интенсивности процесса ползучести за счет увеличения сечения режущего клина, повышения твердости кобальтовой связки при легировании вольфрамом, увеличения теплопроводности твердого сплава.

Абразивно-механический износ инструмента обусловлен микроцарапанием и разрушением передней и задней поверхностей инструмента твердыми компонентами обрабатываемого материала (карбидами, нитридами, упрочняющими интерметаллидными фазами, оксидами) и мелкими частицами периодически разрушающегося нароста. Абразивному изнашиванию подвергается инструмент из углеродистых, легированных, инструментальных, а также быстрорежущих сталей.

Абразивно-химический износ инструмента происходит, когда в составе СОЖ содержатся химически активные вещества, ослабляющие поверхностное напряжение инструментального материала. В результате облегчается процесс абразивного разрушения материала при микроцарапании.

При нагреве твердых сплавов до 600—800 °С происходит поверхностное окисление кобальтовой фазы, карбидов вольфрама и титана с образованием поверхностных пленок, твердость которых в 40—50 раз меньше твердости исходного материала. Это создает условия для более интенсивного абразивно-химического изнашивания.

Адгезионно-усталостное изнашивание инструмента является результатом схватывания инструментального и обрабатываемого материала с последующим вырывом частиц инструментального материала. Наиболее активно адгезионное изнашивание протекает при температуре 0,35—0,5 от температуры плавления материала инструмента и невысокой разности твердостей инструментального и обрабатываемого материалов.

Периодически повторяющееся схватывание и разрушение адгезионных связей вызывает циклическое нагружение контактных слоев инструментального материала, приводящее к его усталости. Развитие усталостных процессов ведет к последующему разрушению металла в виде выкрашивания и сколов. В этих условиях инструментальный материал, обладающий высокими значениями циклической прочности и ударной вязкости, лучше сопротивляется адгезионному изнашиванию.

Диффузионное изнашивание инструмента протекает при таких условиях резания, когда между обрабатываемым и инструментальным материалами устанавливаются устойчивые адгезионные связи и при температурах выше 850 °С происходит взаимная диффузия инструментального и обрабатываемого материалов. Этот вид изнашивания в большей степени характерен при обработке инструментом из твердых сплавов, металлокерамики и алмазным инструментом. При высокотемпературном контактном

взаимодействии происходят следующие процессы: диссоциация карбидов и последующая диффузия их элементов (C, W, Ti) в обрабатываемый материал, т. е. происходит прямое диффузионное растворение; встречная диффузия металлических элементов обрабатываемого материала в связующую фазу твердых сплавов, вызывающая ее разрушение.

В процессе резания с поверхностями инструмента контактируют всегда новые участки стружки и обрабатываемой поверхности детали, что поддерживает перепад концентрации компонентов, способствуя высокой скорости диффузионного изнашивания инструмента.

Реально на практике затупление режущего инструмента происходит в результате

одновременно протекающих различных видов износа и пластического деформирования режущей кромки. Так, при резании быстрорежущим инструментом затупление происходит в результате абразивного, адгезионного износа и пластической деформации режущей кромки.

Параметры износа и стойкости режущего инструмента характеризуют степень допустимого износа инструмента и время его работы до замены или переточки. Они относятся к основным технологическим параметрам процесса резания.

За критерий оптимального износа лезвийного инструмента принимают значение износа по задней поверхности (см. рис. 31.8, *б)*, обеспечивающее максимальный срок службы инструмента при сохранении режущих свойств, он обозначается h_{30} [мм].

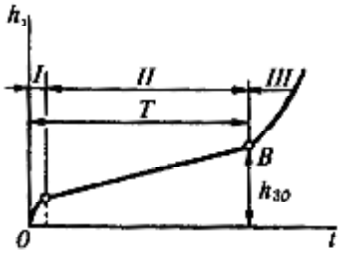


Рис. 31.9. Зависимость износа от времени обработки:
I — участок приработки; *II*— период нормального износа; *III* — период усиленного износа; h_3 — длина износа; *T*— стойкость инструмента

Зависимость износа инструмента от времени обработки при фиксированной скорости резания приведенная на рис. 31.9, показывает, что износ во времени описывается нелинейной функцией и его можно разбить на три периода: участок быстрого износа режущей кромки называют периодом приработки *(I);* участок, при котором скорость затупления является минимальной, называют
периодом нормального износа *(II);* участок, при котором происходит усиленный износ, заканчивающийся посадкой (затуплением) инструмента, называют периодом усиленного износа *(III).*

Условия экстремума функции $h_3 = f(t)$ выполняются в точке *B* с минимальным значением износа h_{3o}, при котором срок службы инструмента получается наибольшим, равным *T*. Под стойкостью инструмента *T* понимают время его работы между двумя переточками. Стойкость токарных резцов колеблется от 30 до 90 мин. Суммарный период полной стойкости инструмента *M*, с учетом числа переточек *K* за весь период эксплуатации, определяется по формуле $M = TK$.

Стойкость инструмента, так же как и его износ, в наибольшей степени зависит от скорости резания, определяющей температуру в зоне резания. Эта зависимость выражается степенным законом:

$$Tv^m = C = \text{const}, \qquad (31.1)$$

где С — эмпирическая константа; *m* — показатель, учитывающий материал инструмента и обрабатываемой детали.

Для твердосплавного инструмента при обработке сталей и алюминиевых сплавов он составляет m = 5; 3, а для быстрорежущих инструментальных сталей при обработке сталей, медных и алюминиевых сплавов он составляет соответственно 8; 6; 3. Если экспериментально установлено, что максимальная стойкость T_0 обеспечивается при скорости резания v_0, тогда стойкость при скорости v из выражения (31.1) можно записать в виде:

$$T = T_0(v_0 / v)^m. \qquad (31.2)$$

Из (31.2) следует, что увеличение скорости резания и по сравнению со скоростью υ_0 ведет к существенному снижению стойкости T. Поэтому выбор скорости резания существенно влияет на стойкость инструмента.

31.8. Определение параметров оптимального режима резания

Из вышесказанного следует, что при обработке резанием происходят сложные процессы, сопровождающиеся изменением температуры, структурными превращениями в обрабатываемых и режущих материалах, зависящие друг от друга. На сегодняшний день эти зависимости и закономерности пока не нашли строгого аналитического решения, поэтому в теории резания используют эмпирические формулы. Параметры оптимального режима резания определяются с учетом стойкости инструмента, качества и производительности обработки. В справочной литературе на сегодняшний день приведены эмпирические формулы для определения параметров процесса для каждого способа механической обработки.

Рассмотрим основные формулы, позволяющие определить параметры процесса на примере обработки заготовки точением.

Расчет усилия резания производится по формуле

$$P_z = C_p h^{xp} s^{rp} \upsilon^n, \qquad (31.3)$$

вид токарной обработки, определяются по справочникам. Значения глубины резания h, подачи s и скорости резания v назначают из условия оптимизации.

По аналогичным формулам рассчитывают усилия P_x и P_y, которые можно принять равными $P_x = 0{,}4P_z$ и $P_y = 0{,}3P_z$.

Мощность резания (кВт) определяют по формуле

Параметры обработки и стойкость резца T связаны между собой следующей эмпирической формулой:

$$\upsilon = C_\upsilon/(T^m h^{xp} s^{yp}), \qquad (31.5)$$

где C_υ — коэффициент, характеризующий вид и условия обработки, учитывающий материал изделия и резца; X_υ, Y_υ, m — показатели, зависящие от свойств обрабатываемого материала, материала резца и вида обработки.

За оптимальный режим резания для конкретного вида обработки и детали принимается наилучшее сочетание параметров резания, обеспечивающее максимальную производительность и качество обработанной поверхности. Как правило, этот режим соответствует и наибольшей экономичности обработки.

Рассмотрим схему определения оптимального режима резания применительно к черновой обработке точением. Вначале задаются глубиной резания. Так как глубина резания не является определяющим фактором стойкости инструмента и качества поверхности, стремятся весь припуск срезать за один проход, тем самым увеличивая производительность точения. Если требования точности и возможности станка не допускают этого, то припуск срезается за два прохода. При первом (черновом) проходе снимается 80% припуска, а при чистовых проходах — остальные 20%. Затем, пользуясь нормативными справочными данными, выбирают станок, инструмент и максимальную подачу s, обеспечивающую заданную шероховатость поверхности R_a с учетом мощности станка, жесткости и динамических характеристик СПИД. После этого определяется скорость резания. Скорость главного движения резания оценивается по эмпирической формуле (31.5), связывающей все параметры обработки. Стойкость резца T задается по справочным значениям исходя из обеспечения допустимого значения

износа для инструмента из выбранного материала. После вычисления скорости резания определяется соответствующая этой скорости частота вращения шпинделя станка, м/с: $n = 1000\upsilon)/(60\pi D_{заг})$. Затем рассчитываются усилие резания P_z по формуле (31.3) и величина прогиба заготовки z от силы P_z, после чего определяют ожидаемую точность размера. Если величина прогиба $2z > 0{,}35\delta$,где δ — заданный допуск на обрабатываемый диаметр заготовки, то расчет повторяется при новой, измененной, величине подачи. Все расчеты выполняют по программе на компьютерах, в память которых вводятся база справочных данных и эмпирические формулы. Выбранный таким образом режим обработки обеспечивает максимальную производительность точения при заданных значениях точности детали и шероховатости ее поверхности.

В табл. 31.1 приведены значения производительности, характеристики упрочнения поверхностного слоя и среднее арифметическое отклонение микропрофиля обработанной поверхности для различных материалов и методов обработки на оптимальных режимах.

Таблица 31.1. Характеристики производительности и состояния поверхностного слоя после обработки резанием

Способ обработки	Характеристики слоя	Сплавы			
		титановые	алюминиевые	жаропрочные	тугоплавкие
Хочение	Скорость резания, м/с	До 2,1	До 1,7	До 0,93	До 2
	Производительность, см^3 /с	До 4,2	До 7,5	До 0,7	До 0,35
	Степень наклепа, %	8—5	20—120	20—99	54—77
	Глубина наклепа, мкм	60—250	10—140	40—260	48—55
	Высота микро-неровностей, мкм	2,5—0,63	0,63—0,04	2,5—1,5	10—2,5
Фрезерование	Скорость резания, м/с	До 3,4	До 4,2	До 3,6	—
	Производительность, см^3 /с	До 1,5	До 2,5·10^3	До 1,2	—
	Степень наклепа, %	8—45	30—130	22—50	40—100
	Глубина наклепа, мкм	60—250	30—150	25—100	20—180
	Высота микро-неровностей, мкм	2,5—0,63	2,5—1,25	5—2,5	10-5
Шлифование	Скорость резания м/с	До 35	—	До 35	До 3
	Производительность, см^3 /с	До 0,07	—	До 0,09	До 0,15
	Степень наклепа, %	8—60	—	15—48	11—59
	Глубина наклепа, мкм	40—190	—	20—100	8—55
	Высота микронеровностей, мкм	1,25—0,63	—	1,25—0,16	0,63—0,08

31.9. Металлорежущие станки

Обработка ведется на металлорежущих станках, обеспечивающих: необходимое усилие резания; регулируемое относительное перемещение инструмента и детали в пространстве с требуемой скоростью, позволяющей получить детали требуемых геометрических форм и размеров с высокой производительностью обработки; жесткое закрепление детали и инструмента, фиксирующее их положение при возмущающих усилиях обработки, что обеспечивает точность размеров и шероховатость обрабатываемых поверхностей.

По технологическому методу обработки станки делят на токарные, сверлильные, фрезерные, шлифовальные и др. По этой схеме все металлорежущие станки разделены на десять групп.

По степени универсальности различают станки универсальные, широкого применения, специализированные и специальные.

Универсальные станки предназначены для обработки деталей широкой номенклатуры и могут выполнять ряд операций. Станки широкого применения предназначены для выполнения определенного вида работ для широкого круга заготовок. Специализированные станки служат для обработки деталей, сходных по конфигурации, но имеющих различные размеры. Специальные станки предназначены для обработки деталей одного типоразмера.

По степени автоматизации станки различают: с ручным управлением, полуавтоматы, автоматы и станки с программным управлением.

По точности установлено пять классов станков: Н — нормальной, П — повышенной, В — высокой, А — особо высокой, С — особо точные станки.

Основную группу составляют станки, предназначенные для изготовления деталей 6—9-го квалитета.

Функциональные элементы станков. Рабочими органами станка являются устройства, обеспечивающие закрепление заготовки и относительное перемещение заготовки и инструмента. У токарного станка это шпиндель с патроном и суппорт.

Электрический или гидравлический двигатель с комплексом механизмов, передающих движение от электродвигателя к рабочим органам станка, называют приводом станка. Различают приводы рабочих, вспомогательных и установочных перемещений заготовки и инструмента. Рабочими движениями называют главное движение и движение подачи, вспомогательными и установочными — движения, служащие для транспортирования и зажима заготовки или инструмента, подвода и отвода рабочих органов станка и т. п. В станках с числовым программным управлением (ЧПУ) каждое движение осуществляется от индивидуального электрического или гидравлического привода. В качестве привода главного движения в станках с ЧПУ используют электродвигатели постоянного тока с тиристорной схемой управления и двух-, четырехступенчатыми коробками скоростей. Это обеспечивает регулировку частот вращения шпинделя в диапазоне, необходимом для управления скоростью резания. В приводах движения подачи этих станков используют высокомоментные электродвигатели в сочетании с встроенными тахогенераторами, что обеспечивает бесступенчатую регулировку перемещения суппортов и столов станка. В конструкциях приводов станков широко используются различные виды передач, к основным типам передач относятся ременная, цепная, зубчатая, червячная, реечная и винтовая. Передачей называют механизм, передающий движение или преобразующий одно движение в другое (например, вращательное движение винта в поступательное движение гайки) и осуществляющий изменение скорости движения.

Общий вид токарного станка с ЧПУ и его основные элементы приведены на рис. 31.10.

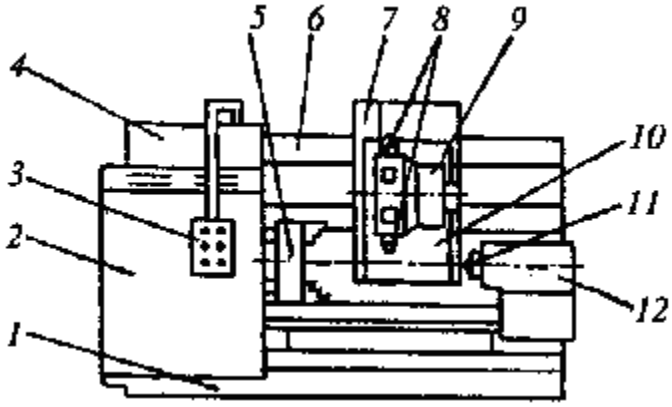


Рис 31.10. Схема токарного станка с ЧПУ

Жесткость и фиксацию неподвижных элементов станка (передней бабки *2* и направляющих *6* для перемещения задней бабки и суппорта) обеспечивает станина *1.* В неподвижной передней бабке размещаются: привод главного движения детали с закрепленным на шпинделе приспособлением *5,* обеспечивающим ее движение со скоростью резания; приводы продольной подачи суппорта 7 и привод поперечной подачи инструмента *8* с револьверной головкой 9, перемещающейся по салазкам *10* суппорта. Передача движений суппорту и револьверной головке с резцом осуществляется от соответствующих приводов с помощью зубчатых и винтовых передач. Револьверная головка снабжена приводом с червячной передачей, обеспечивающей при вращении автоматическую смену инструмента. В задней бабке *12* размешена пиноль с центром *11.* Пиноль задней бабки имеет гидравлический привод и служит для поджима торца длинномерных деталей в процессе обработки. Управляющая аппаратура и ЧПУ размещены в шкафу *4,* управляемом с пульта *3.*

Автоматизацию процесса резания обеспечило применение станков с числовым программным управлением (ЧПУ). Преимущество станков с ЧПУ состоит, прежде всего, в сокращении вспомогательного времени обработки и устранении погрешностей обработки, вызванных недостаточной квалификацией рабочего. Значительным этапом автоматизации механической обработки явилось создание многооперационных станков. Многооперационные станки представляют собой станки с ЧПУ, дополнительно оснащенные передающейся шпиндельной бабкой, столами координатного перемещения и поворота оси детали на необходимый угол, устройствами (магазинами) для размещения и автоматической замены инструмента. Это позволило последовательно выполнять большое число операций обработки разными режущими инструментами без снятия заготовки со станка при одной базе, тем самым снизив погрешности обработки, вызванные установкой детали. В магазинах станка размещается до 300 инструментов. Режущий инструмент подается в рабочее положение с помощью руки-манипулятора по заданной программе. Такие станки позволяют обрабатывать сложные корпусные детали с четырех-пяти сторон, проводя сверление, фрезерование, растачивание и т. д. и превращая заготовку в готовую деталь без съема со станка. Система программного управления производит необходимое изменение режима обработки, управляет вспомогательными движениями рабочих органов, подачей смазочно-охлаждающей жидкости, контролем и рядом других команд.

В современном серийном производстве все большее применение находят гибкие производственные системы (ГПС). Они состоят из исполнительной и единой управляющей системы. Исполнительная система включает станки, роботы, устройства для. транспортирования заготовок деталей и отходов производства, контрольно-измерительные устройства, склады заготовок и готовой продукции. Все элементы исполнительной системы программно управляемы. Единая управляющая система

состоит из средств вычислительной техники, которые управляют как отдельными станками, роботами и технологическими установками, так и всем производством в целом.

31.10. Технологические возможности и область применения способов резания

Точение является основным способом обработки поверхностей тел вращения (см. рис. 31.2, о). Процесс резания осуществляется на токарных станках при вращении обрабатываемой заготовки (главное движение) и перемещении резца (движение подачи). С помощью точения выполняют операции:- обтачивание — обработку наружных поверхностей; растачивание — обработку внутренних поверхностей; подрезание — обработку торцевых поверхностей; резку — разрезание заготовки на части; резьбонарезание — нарезание резьбы.

По технологическим возможностям точение условно подразделяется на: черновое; получистовое; чистовое; тонкое. К черновому точению относят обдирку, отрезку и подрезку торцов заготовок. Обычно черновое точение используют для предварительной обработки заготовок. Чистовое обтачивание и растачивание обеспечивают обработку по 10—8-му квалитету и шероховатость поверхности $^{Rz40}\sqrt{}$—$^{Rz20}\sqrt{}$. Тонкое точение позволяет при обтачивании получить 6—7-й квалитет и шероховатость $^{1,6}\sqrt{}$. При точении параметры резания определяются скоростью резания υ, подачей s_0 и глубиной резания h.

В качестве режущего инструмента при точении используются резцы (см. рис. 31.3, *а)*. Головку резца изготавливают из инструментальных, быстрорежущих сталей, твердых сплавов, минералокерамики и сверхтвердых материалов; стержень изготавливают из конструкционной стали.

Резцы классифицируют по материалу режущей головки, ее форме (прямые, отогнутые, изогнутые, оттянутые), виду выполняемой операции (проходные, отрезные и т. п.), виду точения (черновые, чистовые).

К конструкциям деталей, обрабатываемых точением, предъявляется ряд требований, обеспечивающих их технологичность при обработке. Технологичной является конструкция детали, масса которой уравновешена относительно оси вращения, отсутствуют нежесткие валы и втулки; в чертеже детали используются одинаковые радиусы скруглений; режущий инструмент имеет свободный вход и выход из материала заготовки: отсутствуют фасонные поверхности, требующие изготовления фасонных резцов; диаметры ступеней ступенчатых валов располагаются по возрастающей степени; участки вала или отверстия, имеющие один и тот же размер, но разный допуск, разделены кольцевой разделительной канавкой.

Сверление является основным способом получения глухих и сквозных цилиндрических отверстий в сплошном материале заготовки (см. рис. 31.2, б). В качестве инструмента при сверлении используется сверло (см. рис. 31.3, в), имеющее две главные режущие кромки, переднюю кромку и две винтовые канавки, служащие для удаления стружки. Для сверления используются сверлильные и токарные станки. На сверлильных станках сверло совершает вращательное (главное) движение резания и продольное (движение подачи) вдоль оси отверстия, заготовка неподвижна. При работе на токарных станках вращательное (главное) движение совершает обрабатываемая деталь, а поступательное движение вдоль оси отверстия (движение подачи) совершает сверло.

Параметрами режима резания при сверлении являются скорость резания υ(окружная скорость на периферии сверла) и подача s_0 (см. рис. 31.4, б).

Процесс стружкообразования при сверлении протекает в более тяжелых условиях по

сравнению с точением, так как при сверлении более стеснен выход стружки и затруднен подвод смазочно-охлаждающей жидкости в зону резания.

При сверлении обеспечиваются точность не выше 14—12-го квалитета и шероховатость поверхности $^{Rz80}\sqrt{}$— $^{Rz60}\sqrt{}$.

Для получения отверстий более высокой точности и чистоты поверхности после сверления на том же станке выполняются зенкерование и развертывание.

К конструкциям деталей, обрабатываемых сверлением, предъявляется ряд требований, обеспечивающих их технологичность при обработке. Технологичной является конструкция детали, у которой отверстия выполняются сквозными, если к ним предъявляются высокие требования по точности; форма и размеры дна глухих отверстий соответствуют форме и размерам стандартного сверла; поверхность, в которую врезается сверло, перпендикулярна направлению его движения; отсутствуют глубокие сквозные, глухие отверстия и отверстия с выточками; отверстия в детали с несколькими соос-ными отверстиями должны располагаться так, чтобы их диаметры уменьшались в одном направлении.

Строгание применяется при обработке плоских и фасонных линейчатых поверхностей и различных канавок в условиях единичного и мелкосерийного производства (см. рис. 31.2, *г)*.

Главное движение при строгании — возвратно-поступательное прямолинейное, а движение подачи — шагообразное, направленное перпендикулярно главному движению (см. рис. 31.4, *г)*.

Обработку выполняют на строгальных станках. На продольно-строгальном станке главное движение осуществляет заготовка, а движение подачи — резец, на по поперечно-строгальном станке главное движение совершает резец, а движение подачи—заготовка, закрепленная на столе станка.

Процесс резания при строгании имеет прерывистый характер, и срезание стружки происходит только при встречном относительном движении резца и заготовки. Во время обратного (вспомогательного) хода резец работу не производит. Врезание резца в заготовку в начале каждого рабочего хода сопровождается ударом, за время холостого хода резец остывает, поэтому при строгании в большинстве случаев не применяются смазочно-охлаждающие жидкости. Ударные нагрузки и циклический характер нагрева существенно снижают стойкость резцов в сравнении с непрерывным резанием, поэтому строгание производят при умеренных скоростях резания. Головки и державки строгальных резцов выполняют более массивными, чем у токарных. При строгании параметрами режима, так же как и при точении, являются скорость резания и, подача s и глубина резания h. В зависимости от параметров резания и вида резцов процессы строгания разделяют на черновые и чистовые. Чистовое строгание обеспечивает точность обработки по 8—7-му квалитету и шероховатость $^{1,6}\sqrt{}$ что не уступает поверхностям, полученным чистовым точением.

К конструкциям деталей, обрабатываемых строганием, предъявляется ряд требований, обеспечивающих их технологичность. Технологичной при обработке строганием является конструкция детали, у которой форма поверхности представляет плоскость или сочетание плоскостей; обрабатываемые поверхности расположены в одной плоскости, что позволяет обрабатывать их за один проход; обрабатываемые поверхности заготовки расположены в параллельных плоскостях и имеют разделительные канавки для выхода резца шириной b = 10—15 мм при обработке на поперечно-строгальных станках и b = 30—40 мм при обработке на продольно-строгальных станках; в углах пересечения обрабатываемых поверхностей предусмотрена разделительная канавка для выхода резца; пазы, обрабатываемые строганием, являются сквозными, обеспечивая свободный заход и выход резца.

Фрезерование является высокопроизводительным и широко распространенным методом обработки резанием наружных и внутренних фасонных поверхностей (см. рис.

31.*2*, в). Обработка ведется многолезвийным режущим инструментом — фрезой (см. рис. 31.3, б). Главным движением при фрезеровании является вращение фрезы, а вспомогательным — поступательное перемещение заготовки. Каждый режущий зуб при вращении фрезы врезается в заготовку и осуществляет резание только в пределах определенного угла поворота фрезы, а затем вращается вхолостую до следующего врезания. Таким образом, особенностью процесса фрезерования является периодичность и прерывистость процесса резания каждым зубом фрезы, причем процесс врезания зуба сопровождается ударами.

По исполнению фрезы делятся на цилиндрические, когда зубья располагаются только на цилиндрической поверхности фрезы, и торцевые, у которых режущие зубья располагаются на торцевой и цилиндрической поверхностях фрезы. Соответственно, в зависимости от типа используемой фрезы, фрезерование подразделяется на цилиндрическое и торцевое. При цилиндрическом фрезеровании работу резания выполняют зубья, расположенные нацилиндрической поверхности фрезы, а при торцевом фрезеровании в работе резания участвуют как зубья на цилиндрической поверхности, так и зубья на торцевой поверхности фрезы. Фрезерование в обоих случаях делят на попутное либо встречное. Попутным называют фрезерование, когда направления главного движения резания и движения подачи совпадают, в противном случае фрезерование называют встречным. Попутное фрезерование снижает износ фрезы и шероховатость обработанной поверхности, поэтому оно предпочтительнее.

При фрезерной обработке заготовок точность поверхностей, обрабатываемых торцевой и цилиндрической фрезами, соответствует 11-му квалитету. Шероховатость при чистовом фрезеровании составляет $^{Rz20}\surd$. Основными параметрами резания при фрезеровании являются скорость главного движения резания υ, подача s, глубина резания h и ширина фрезерования B. Процесс фрезерования выполняется на станках фрезерной группы.

К конструкциям деталей, обрабатываемых фрезерованием, предъявляется ряд требований, обеспечивающих их технологичность. Технологичной является конструкция, у которой обрабатываемые выступы имеют одинаковую высоту; обрабатываемые посадочные места под присоединяемые детали
с наружной стороны корпуса; пазы открыты для ввода фрезы, иначе при обработке закрытых пазов потребуется засверливание отверстий для входа фрезы; форма пазов и прорезей позволяет вести обработку дисковыми, а не концевыми (торцевыми) фрезами.

Протягивание является высокопроизводительным методом обработки деталей разнообразных форм и применяется в крупносерийном производстве (см. рис. 31.*2, д)*. При протягивании используется сложный дорогостоящий инструмент — протяжки. Они представляют собой сложный многолезвийный инструмент с необходимым числом зубьев, формообразующих периметр обрабатываемой поверхности. За каждым формообразующим зубом вдоль протяжки изготавливается ряд зубов постепенно увеличивающейся высоты. Процесс резания при протягивании осуществляется на протяжных станках при поступательном главном движении инструмента — протяжки — относительно неподвижной заготовки за один проход. В зависимости от обрабатываемой поверхности различают внутреннее и наружное протягивание.

При внутреннем протягивании обработке подвергаются внутренние поверхности деталей замкнутого контура (отверстия круглые, многогранные, шлицевые, шпоночные и др.). Наружным протягиванием обрабатывают наружные поверхности деталей типа шлицов, не имеющие замкнутой формы. Точность обработки поверхностей при протягивании соответствует 8—7-му квалитету, а шероховатость поверхности $^{Rz40}\surd$—$^{Rz1,6}\surd$

К конструкциям деталей, обрабатываемых протягиванием, предъявляется ряд требований, обеспечивающих их технологичность. Технологичной является конструкция детали, у которой торец заготовки перпендикулярен оси отверстия со стороны входа и

выхода протяжки, что исключает перекос протяжки при обработке; фасонные отверстия при протяжке должны иметь симметричную форму.

Шлифование является процессом обработки заготовок резанием с помощью абразивного круга, состоящего из абразивных зерен и связующего. Каждое абразивное зерно в зоне обработки работает как фреза, снимая стружку с детали в пределах определенного угла поворота. Главным движением при шлифовании является вращение шлифовального круга, а перемещение круга относительно детали является движением подачи (см. рис. 31.2, *е)*.

При шлифовании обрабатываемый материал срезается в виде большого числа стружек. Обработанная поверхность представляет собой совокупность микроследов абразивных зерен. Часть зерен, ориентированных к направлению резания тупой гранью, в процессе резания не участвуют. Они вызывают потери энергии на трение, пластичное деформирование, увеличивают нагрев контактирующих поверхностей инструмента и заготовки. Для отвода теплоты при шлифовании процесс ведется с обильной подачей смазочно-охлаждающей жидкости.

Основная область применения процесса шлифования — чистовая и отделочная обработка деталей для обеспечения высокой точности размеров и малой шероховатости поверхности. Кроме того, шлифование используется как один из методов размерной обработки труднообрабатываемых материалов: керамики, ситаллов, твердых сплавов, деталей га закаленных сталей и т. д.

Различают плоское шлифование (рис. 31.11, а), при котором обрабатывается плоская поверхность, и круглое шлифование (рис. 31.11,6), при котором обрабатывается поверхность тела вращения. В обоих случаях обрабатываются как наружные, так и внутренние поверхности деталей. Плоское шлифование может осуществляться периферией или торцом шлифовального круга.

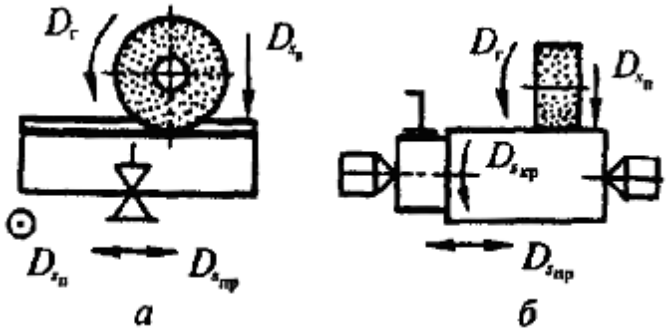


Рис. 31.11. Схемы шлифования: *а* — плоского; *б* — круглого

Скорость резания при шлифовании определяется окружной скоростью шлифовального круга и составляет 20—80 м/с. При этом глубина шлифования составляет 0,05—0,005 мм. Все большее применение находит силовое шлифование для обработки труднообрабатываемых резанием материалов (керамики, ситалла, твердых сплавов). При силовом или врезном шлифовании глубина шлифования может достигать 10—12 мм.

Для выполнения процесса шлифования наружных поверхностей деталей используются круглошлифовальные, плоскошлифовальные и бесцентрово-шлифовальные станки. Для обработки сложных фасонных поверхностей используются специальные лентошлифовальные станки.

В лентошлифовальных станках применяется инструмент в виде бесконечной абразивной ленты. Лента в процессе шлифования поверхности деталей сложной формы (например, лопаток турбин) огибает сложную поверхность и перемещается в осевом и продольном направлениях. Абразивный слой, производящий обработку, наносят на бумажную или тканевую основу ленты.

Для шлифования резьбы используются автоматические резьбошлифовальные станки.

Шлифование обеспечивает размеры по 8—5-му квалитету и следующие значения шероховатости поверхности: при внутреннем шлифовании до $^{0,1}\sqrt{}$, при наружном шлифовании — до $^{0,4}\sqrt{}$.

К конструкциям деталей, обрабатываемых шлифованием, предъявляется ряд требований, обеспечивающих их технологичность. Технологичной является конструкция, у которой необрабатываемые и обрабатываемые поверхности детали, находящиеся в одной плоскости, разделены канавкой; предусмотрены центровые отверстия для ступенчатых валов и установочные фаски у пустотелых валов для их фиксации при обработке; предусмотрены технологические канавки для входа и выхода шлифовального круга.

Шлифованием обрабатываются только жесткие детали, не деформирующиеся в процессе обработки; способ не допускает обработки малых от верстай; обрабатываемые поверхности должны располагаться в одной плоскости; все плоские обрабатываемые поверхности в конструкции располагаются параллельно или перпендикулярно базовой поверхности детали.

Хонингование — процесс чистовой абразивной обработки поверхностей, выполняемый мелкозернистыми абразивными брусками, закрепленными в хонинговальной головке (хоне) (рис. 31.12). Схему процесса см. на рис. *31.3, ж*.

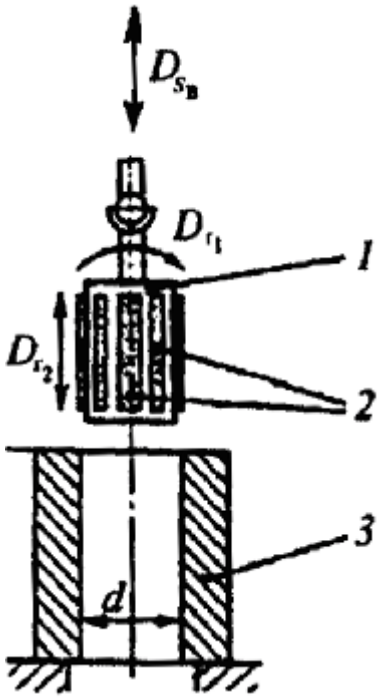


Рис. 31.12. Схема хонингования отверстий: *1* — хон; *2* — абразивные бруски; *3* — обрабатываемая деталь

Бруски вращаются и одновременно перемешаются вдоль оси обрабатываемого цилиндра возвратно-поступательно. Соотношение скорости вращения и скорости поступательного движения составляет 1,5—10. Хонинговальные бруски изготавливают из электрокорунда, карбида кремния и алмаза на керамической и бакелитовой связке. Абразивный брусок в процессе обработки контактирует с обрабатываемой поверхностью, раздвигаясь в радиальных направлениях механическими, гидравлическими и пневматическими устройствами. Давление брусков на поверхность среза контролируется. Режущий инструмент хона в процессе обработки самоустанавливается по отверстию. Обрабатывают изделия с диаметром отверстий от 3 до 1000 мм и в несколько метров длиной.

При хонинговании в работе участвует в 10^2—10^3 раз большее число абразивных зерен,

чем при шлифовании, резания в 50-—120 раз меньше, чем при шлифовании, а давление абразивного инструмента на обработанную поверхность в 6—10 раз ниже, чем при шлифовании, т.е. для хонингования характерны малые силы резания, небольшие толщины срезаемых слоев материала и незначительное тепловыделение. Хонингование производят при обильном охлаждении зоны резания СОЖ.

При хонинговании на обработанной поверхности образуется микропрофиль в виде сетки. Такой профиль позволяет удержаться смазочному материалу на поверхности детали. Наибольшее распространение хонингование получило в автотранспортной и авиационной промышленности при обработке сильнонагруженных деталей. Отверстия после отделочной обработки хонингованием имеют точность на уровне 7—6-го квалитета и шероховатость до $^{0,05}\sqrt{}$.

Суперфиниш, так же как, и хонингование, относится к процессам отделочной обработки поверхностей. Это процесс сверхтонкой абразивной обработки наружных и внутренних поверхностей; колеблющимися брусками при движении заготовки. Бруски для суперфинишной обработки изготавливают из электрокорунда, карбида кремния, алмаза. В качестве связки в брусках используют керамическую и бакелитовую связку. Размеры и форма абразивных брусков определяются размером и конфигурацией обрабатываемой поверхности. Чаще для суперфиниша используют два бруска, а при обработке крупных деталей — три-четыре. Схема обработки наружной цилиндрической поверхности приведена на рис. 31.13.

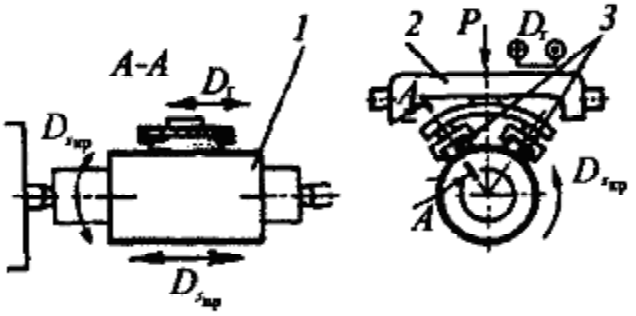


Рис. 31.13. Схема обработки суперфинишированием:
1 — обрабатываемая деталь; 2 — обрабатывающая головка; 3 — абразивные

Обработка осуществляется суперфинишной головкой при сочетании трех движений: вращательного движения заготовки, возвратно-поступательного и колебательного движения брусков (схему процесса см. на рис. 31.4, *ж)*. Амплитуда колебаний брусков составляет 1,5—6 мм, а частота — 400—1200 колебаний в минуту. В процессе резания подпружиненные бруски прижимаются к обрабатываемой поверхности с давлением (0,5—3)-10^5 Па. Главным движением резания является колебательное' движение брусков, его скорость при обработке составляет 0,1—0,2 м/с.

При суперфинишировании используется смазочно-охлаждающая жидкость, образующая масляную пленку, это смесь керосина (80—90%) с веретенным или турбинным маслом (10—20%). Масляная пленка прорывается на микровыступах, и они в первую очередь срезаются абразивом, т. е. при суперфинише удаляются только выступы, оставшиеся от предыдущей обработки. Процесс прекращается автоматически, когда выступы срезаются, пленка становится сплошной и создаются условия для чисто жидкостного трения между бруском и обрабатываемой поверхностью. В результате хонингования шероховатость поверхности снижается до $^{0,05}\sqrt{}$.

31.11. Обрабатываемость конструкционных материалов резанием

Обрабатываемость материала резанием относится к технологическим свойствам конструкционных материалов и характеризует степень сложности их механической обработки режущими инструментами. Оценку обрабатываемости материала производят методом сравнения с обрабатываемостью стали 45, значение которой принимается за единицу. К легкообрабатывае-мым материалам с $K_0 < 1$ относят: латуни, бронзы, дюралюмины и чугуны (НВ 140—160). Обрабатываемостью ниже средней, $K_0 > 1$, обладают высоколегированные стали аустенитного класса, стали мартенситного, мартенситно-ферритного, аустенитно-мартенситного классов, жаростойкие, кислотостойкие стали, композитные материалы, никелевые и твердые сплавы, керметы и минералы (рубин, сапфир, кремний и др.). Обрабатываемость конструкционных материалов зависит от их механических свойств, в первую очередь прочности и твердости. Она ухудшается с увеличением в сплаве упрочняющих фаз, неметаллических включений, измельчением структуры, наличием легирующих элементов (хрома, никеля) и увеличением вязкости.

Улучшение обрабатываемости материалов механической обработкой достигается предварительной термической обработкой заготовок, применением инструмента из твердых сплавов и сверхтвердых материалов, подбором и использованием смазочно-охлаждающих жидкостей, оптимизацией режимов резания, легированием конструкционных сплавов. Например, легирование сталей серой, селеном, свинцом и другими металлами, облегчающими процесс резания. Обработка таких труднообрабатываемых материалов, как жаропрочная сталь и тугоплавкие сплавы, на оптимальных режимах малопроизводительна (см. табл. 31.1). Поэтому детали из этих материалов обрабатывают методами физико-химической обработки.

Контрольные вопросы

1. Назовите задачи размерной обработки. Что положено в основу классификации способов размерной обработки?
2. Назовите основные параметры режима резания при фрезеровании и типы образующихся стружек.
3. Каковы причины нагрева зоны резания обрабатываемого материала и способы снижения нагрева?
4. Перечислите группы инструментальных материалов.
5. Что принимается за критерий износа режущего инструмента?
6. Назовите причины и виды износа инструмента.
7. Перечислите технологические требования к конструкции обрабатываемой детали при точении.
8. Что вызывает образование нароста при резании и каково его влияние на процесс?
9. Назовите основные элементы токарного станка и их функциональное назначение.
10. Что лежит в основе построения гибких производственных систем и почему они не могли появиться 30—40 лет тому назад?
11. Чем определяются качество и точность обработки резанием?