

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Характерной особенностью развития современного машиностроения является все большее увеличение мощностей машин, повышение их скоростей, рост давлений, температур рабочих режимов и т. п.

Одни из основных требований, предъявляемых сегодня к любому изделию в машиностроении — технологичность в изготовлении, минимальная стоимость и максимальная надежность в эксплуатации.

Искусство оптимальной организации производства и обеспечение его малой себестоимости заключается в умении выбрать такую последовательность комбинаций технологических процессов, начиная с методов получения заготовок и заканчивая механической обработкой и сборкой машин, при которой продолжительность всего цикла производства и общая стоимость изделий, сохраняя заданное качество, были бы наименьшими.

Точность изготовления деталей машин и связанная с ней надежность изделий являются в современном машиностроении первостепенной задачей. Недостаточная точность или необоснованное ее завышение недопустимы. В первом случае изделие может быть недостаточно работоспособно и надежно, а во втором случае значительно усложняется его производство и, следовательно, увеличивается себестоимость.

Решение вопросов точности, начиная от методов получения заготовок и заканчивая их механической обработкой, должно проходить комплексно. Так, повышение точности изготовления заготовок деталей машин и механизмов при росте их себестоимости снижает трудоемкость и себестоимость механической обработки, и наоборот. В свою очередь, повышение точности механической обработки сокращает трудоемкость и себестоимость сборки машин в результате устранения пригоночных работ и обеспечения принципа взаимозаменяемости деталей изделия.

В современном машиностроении основным технологическим процессом, обеспечивающим изготовление деталей заданной точности (формы, размеров, взаимного положения поверхностей) и состояния поверхностного слоя, является обработка резанием со снятием стружки (механическая обработка), включающая в себя обработку лезвийным и абразивным инструментами. Несмотря на совершенствование методов получения заготовок, их удешевление, уменьшение ве-

личины припусков, развитие электрофизических, электрохимических и других методов обработки, относительный объем механической обработки за последние годы не уменьшается. Это объясняется двумя главными причинами:

1) в связи с непрерывным повышением требований к качеству машин увеличивается объем чистовых и финишных процессов обработки;

2) частая смена объектов производства снижает количество изготавливаемых деталей в партии (серийность производства), требует более быстрой автоматизированной технологической подготовки производства.

Механическая обработка в таких условиях является наиболее мобильной, гибкой и экономически целесообразной. Она ведется в настоящее время в основном на дорогом автоматизированном оборудовании и комплексах с микропроцессорным управлением. Стоимость одного станкочаса работы такого оборудования очень велика. Поэтому разработка рациональных технологических процессов изготовления деталей на таком оборудовании, выбор инструментальных материалов, конструкции инструментов и режимов резания требует особого подхода.

Изготовление деталей резанием — один из самых старых технологических процессов, который применяется для окончательной обработки литых и кованых заготовок, а также заготовок, получаемых из проката.

Большое многообразие обрабатываемых материалов и видов заготовок, методов механической обработки, инструментальных материалов и конструкций инструментов, их геометрических параметров, смазывающих и охлаждающих технологических сред, широкие диапазоны изменения режимов резания обуславливают неограниченное количество вариантов обработки.

Первое глубокое научное исследование процесса резания было выполнено в России в 1865–1880 гг. Одним из ведущих исследователей и основоположников науки о резании металлов был профессор И. А. Тиме. Он первый поставил и разрешил основные вопросы, которые и поныне остаются центральными при изучении процесса резания, а именно: о сопротивлении — усилия резания, о процессе стружкообразования — видах стружки и условиях, при которых она образуется.

В 1870 г. И. А. Тиме предложил классификацию типов стружек, образующихся при резании различных материалов. Классификация оказалась настолько удачной, что несмотря на то, что со временем появились совершенно иные конструкционные материалы, обрабатывающиеся с иными режимами резания, ее пользуются и в настоящее время.

В 1880–1890 гг. трудами отечественных ученых П. А. Афанасьева, А. В. Гадолина, К. А. Зворыкина и А. А. Бригса были решены основные вопросы динамики и механики процесса резания металлов. Своими исследованиями эти ученые на много лет опередили современную им иностранную науку.

Дальнейшим этапом в развитии исследований процессов резания металлов явились работы Я. Г. Усачева в период 1900–1917 гг.

Большой вклад в разработку теории процесса резания лезвийным инструментом внесли советские ученые А. И. Каширин, В. А. Кривоухов, И. М. Беспрозванный, С. Д. Тишин, В. Д. Кузнецов, Г. И. Грановский, Б. И. Костецкий, А. Н. Исаев, М. И. Ларин, Н. И. Зорев, А. М. Розенберг, С. Ф. Глебов, А. П. Еремин, С. С. Рудник, Н. И. Резников, В. И. Подураев, Т. Н. Лоладзе, Е. Г. Коновалов, В. Ф. Бобров, А. О. Этин, А. И. Бетанели, С. С. Силин, А. Д. Макаров, В. Г. Подпоркин, А. Я. Малкин, В. И. Петров, М. А. Шатерин, И. Г. Жарков, М. Ф. Семко, Н. В. Талантов, А. М. Вульф, С. Н. Филоненко и многие другие.

В последнее время все процессы обработки металлов резанием рассматриваются с точки зрения деформации, остаточных напряжений и их дислокаций. Это работы В. В. Абрамова, С. Амеликса, А. М. Сулимы, В. К. Старкова, В. Ф. Безъязычного, М. Т. Коротких, А. Г. Суслова и других.

Основные закономерности процесса шлифования (резание материалов абразивным инструментом) раскрыты в работах П. Е. Дьяченко, Е. И. Маслова, А. А. Маталина, П. И. Ящерицына, А. В. Подзея, В. А. Шальнова, Д. Г. Евсеева, З. И. Кремня, В. Ф. Макарова, В. И. Муцянко, В. А. Носенко, Г. Д. Полосаткина, В. А. Сипайлова, Ю. С. Степанова, Л. Н. Филимонова, А. В. Якимова и других.

В данном учебнике описаны наиболее общие, принципиальные положения теории и практики формообразования деталей машин методами механической обработки и инструменты для осуществления широко используемых в производстве технологий этой обработки.

Авторы постарались в относительно краткой форме обобщить теоретические основы и практическое значение теории резания материалов, изложенные в трудах ученых, перечисленных выше, с учетом современных взглядов на процессы, происходящие при обработке заготовок деталей машин, а также результаты собственных работ в этом направлении.

Авторы выражают искреннюю признательность профессору А. Г. Суслову и доценту В. Г. Юрьеву за ценные замечания и помочь в работе над данным учебником, а также профессору В. В. Максарову и профессору М. Г. Коротких, взявшим на себя труд рецензирования учебника и сделавшим ряд ценных замечаний и предложений, которые были учтены при доработке учебника.

Учебник предназначен для подготовки бакалавров, специалистов и магистров по направлениям:

- › машиностроение;
- › конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительного производства;
- › автоматизация технологических процессов в машиностроении;
- › оборудование и технологии автоматизированного производства и другим аналогичных направлениям родственных специальностей.

## УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

ТП — технический процесс

ТО — технологическая операция

САПР — системы автоматизированного проектирования

САПР ТП — системы автоматизированного проектирования технологических процессов

ЧПУ — числовое программное управление (станок ЧПУ)

ОЦ — обрабатывающий центр (станок)

ГАП — гибкое автоматизированное производство

ГПС — гибкая производственная система

СТО — средства технологического оснащения

МНТП — многогранная неперетачиваемая твердосплавная пластина

СТМ — сверхтвердые материалы

СА — синтетический алмаз

КНБ — кубический нитрид бора

Эльбор, Бельбор, Боразон — торговые марки КНБ

ЭУ — энергетическая установка

ТЭП — технико-экономические показатели

СОТС — смазочно-охлаждающая технологическая среда

СОТЖ — смазочно-охлаждающая технологическая жидкость

# *ГЛАВА 1*

## **МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ, И ИХ ОБРАБАТЫВАЕМОСТЬ РЕЗАНИЕМ**

Сущность технологии изготовления деталей машин состоит в последовательном использовании различных технологических способов воздействия на обрабатываемую заготовку с целью придать ей заданную форму и размеры указанной точности. Одним из таких способов является механическая обработка заготовок резанием. Она осуществляется металлорежущим инструментом и ведется на металлорежущих станках. Обработка резанием заключается в срезании с обрабатываемой заготовки некоторой массы металла, специально оставленной на обработку и называемой припуском [11, 34, 35, 46, 57].

### **1.1. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МЕТАЛЛЫ И ИХ МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА**

В машиностроении для изготовления несущих нагрузку деталей используют различные конструкционные металлы [10, 34, 35, 42].

К основным конструкционным металлам относят:

а) черные металлы — сплавы на основе железа (углеродистые, легированные и нержавеющие стали, специальные сплавы, чугуны);

б) цветные металлы — сплавы на основе меди, алюминия, титана и других элементов.

Конструкционные металлы имеют различные механические свойства, зависящие от их химического состава и структурного состояния. Сочетание таких характеристик, как химический состав, механические свойства и структурное состояние металла определяет его сопротивление обработке резанием. Обрабатываемость металла резанием находит свое проявление в общих закономерностях процессов стружкообразования, формирования новых поверхностей и качества обработанных поверхностей.

В машиностроении принята стандартная маркировка конструкционных металлов, где указывается процентное содержание в металле основных легирующих элементов. Маркировка конструкционных материалов состоит из сочетания букв русского алфавита и цифр. Для легирующих элементов приняты следующие буквенные обозначения: азот — А; ниобий — Б; вольфрам — В; марганец — Г; медь — Д; селен — Е; молибден — М; никель — Н; фосфор — П; бор — Р;

кремний — С; титан — Т; углерод — У; ванадий — Ф; хром — Х; цирконий — Ц; алюминий — Ю.

В маркировке за каждой из букв обычно указаны цифры, которые показывают содержание (в процентах) соответствующего легирующего элемента, закодированного этой буквой. Если цифры нет, то содержание данного элемента равно одному проценту. Цифры, стоящие в маркировке первыми, указывают содержание в металле углерода в сотых долях процента.

Элементы, содержание которых в металле менее одного процента, в маркировку не включаются. Например, конструкционная углеродистая сталь 45 содержит 0,45% углерода; хромистая сталь 40Х содержит 0,4% углерода и 1% хрома; хромоникелевая сталь 30ХН содержит 0,3% углерода, 1% хрома и 1% никеля.

По составу и содержанию легирующих элементов конструкционные стали делятся на группы:

- › стали, содержащие только углерод, образуют группу наиболее широко применяемых в машиностроении углеродистых конструкционных сталей (стали 40, 45 и др.);
- › стали, содержащие, кроме углерода, около одного процента хрома, образуют группу более качественных хромистых конструкционных сталей (стали 20Х, 40Х и др.);
- › стали, содержащие 0,2–0,5% углерода и по 1% хрома и никеля, образуют группу хромоникелевых сталей (стали 20ХН, 30ХН и др.);
- › стали, содержащие, кроме углерода, по 1% еще трех легирующих химических элементов, образуют группы хромокремнемарганцовистых (стали 20ХГСА, 30ХГСА и др.), хромоникелевольфрамовых (стали 20ХНВА и др.), хромоникелемолибденовых (стали 40ХНМА и др.) сталей.

Наиболее широко применяемые в машиностроении марки углеродистых и низколегированных конструкционных сталей и их механические свойства приведены в таблице 1.1. Из приведенных в ней данных видно, что легированные стали имеют более высокие механические свойства, чем углеродистые. С повышением механических свойств металлов (твердости предела прочности) возрастает сопротивление металлов обработке резанием, т. е. ухудшается их обрабатываемость.

Цветные металлы и их сплавы всех марок сравнительно легко поддаются обработке резанием. Исключение составляют титановые сплавы.

По сравнительной обрабатываемости резанием, энергоемкости образования новых поверхностей на заготовках и на срезаемой стружке все конструкционные материалы могут быть условно разделены на четыре группы:

- 1) легкообрабатываемые, например латуни, бронзы, деформируемые сплавы алюминия, мягкие чугуны;
- 2) средней обрабатываемости — углеродистые и низколегированные конструкционные стали, силумины, чугуны средней твердости;
- 3) ниже средней обрабатываемости — высоколегированные нержавеющие конструкционные стали мартенситного, мартенситно-ферритного, аустенитно-мартенситного класса, твердые чугуны;
- 4) труднообрабатываемые — высоколегированные конструкционные стали аустенитного класса, жаропрочные и жаростойкие и тугоплавкие сплавы.

Механические свойства конструкционных сталей

Группа сталей	Марка	Твердость, HB	Предел текучести, $\sigma_{tr}$ , ГПа	Предел прочности $\sigma_B$ , ГПа	Относительное удлинение, $\delta$ , %
углеродистые	40	187	0,34	0,58	19
	45	197	0,36	0,61	16
	50	207	0,38	0,64	13
хромистые	20Х	179	0,65	0,80	11
	40Х	217	0,80	1,00	10
	45Х	229	0,85	1,05	9
хромоникелевые	20ХН	197	0,60	0,80	14
	30ХН	207	0,80	1,00	14
	45ХН	217	0,85	1,05	10
хромокремне-марганцовистые	20ХГСА	207	0,65	0,80	12
хромоникеле-вольфрамовые	30НВА	241	0,80	1,00	10
хромоникеле-молибденовые	40ХНМА	269	0,95	1,10	12

Стали, поставляемые металлургической промышленностью машиностроительным заводам, находятся в отожженном состоянии. Если структурное состояние и механические свойства сталей в состоянии поставки не удовлетворяют требованию изготовления из них качественных деталей, то эти стали подвергаются промежуточной термообработке с целью улучшить их структурное состояние и механические свойства.

После промежуточной термообработки твердость и предел прочности улучшенной конструкционной стали возрастают в среднем на 40% по сравнению с аналогичными параметрами в состоянии поставки. Благодаря промежуточной термообработке существенно повышается качество обработанных поверхностей на деталях. В связи с изменением механических свойств использование термической обработки приводит к изменению обрабатываемости резанием одной и той же марки конструкционной стали.

Установлено, что между твердостью HB и пределом прочности для сталей различных марок существует следующая зависимость [10, 11, 38, 42]:

$$\sigma_B \approx kHB.$$

Для углеродистых конструкционных сталей коэффициент пропорциональности  $k = 0,27$ , для низколегированных сталей  $k = 0,31$ , для высоколегированных сталей  $k = 0,41$ .

В производстве на этапе входного контроля материал, поступающий в металлообработку, значительно проще проверить по твердости HB, а не по значению предела прочности  $\sigma_B$ . Поэтому твердость принята в качестве основного параметра, выражающего влияние механических свойств металлов на уровень режимов их обработки резанием.

## 1.2. СОСТАВ И СВОЙСТВА ОБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

Все применяемые для изготовления деталей машин материалы подразделяются на восемь групп. Кроме того, имеется еще отдельная группа тугоплавких материалов, а также группа материалов с использованием углеродного и других волокон (углепластики и др.) [16]. Однако, если рассматривать только материалы, наиболее применяемые в машиностроении, то их по обрабатываемости можно условно свести в четыре характерные группы.

К I группе относятся легированные стали мартенситного класса со средним и высоким содержанием углерода ( $C = 0,3\text{--}1\%$ ) и небольшим процентом других элементов (Cr, Ni, Mn, Si и др.). После термической обработки — закалки и соответствующего отпуска стали получают достаточно высокую прочность и твердость.

II группа включает в себя нержавеющие жаропрочные сложнолегированные стали аустенитного, аустенитно-ферритного и аустенитно-мартенситного классов. Стали содержат небольшое количество углерода ( $C = 0,1\%$ ), значительный процент Cr, Ni, Mn и немного Ti, Cu, N. Они характеризуются средней прочностью, высокой пластичностью, пониженной теплопроводностью и обрабатываемостью. Обрабатываемость их по скорости резания в 2–3 раза ниже, чем стали 45. Стали такого класса широко применяются для изготовления цельных и сварных деталей, арматуры, крепежа, работающих при температурах 400–650° и в агрессивных средах.

В III группу входят жаропрочные деформируемые и литейные сплавы на никелевой основе. Сплавы содержат относительно большое количество Cr, Ti, Al, Mo и небольшие добавки C, Si, Mn, B, N, имеют высокую прочность и пластичность, низкую теплопроводность, сохраняют механические свойства при нагреве до температур 75–1000°. Они применяются для изготовления ответственных деталей двигателей (дисков и лопаток турбин, лопаток сопловых аппаратов, крепежных деталей и др.). Сплавы имеют низкую обрабатываемость резанием:  $K_v = 0,05\text{--}0,15$  по отношению к стали 45 и  $K_v = 0,1\text{--}0,3$  к стали 1X18H9T.

В IV группу входят сплавы на титановой основе, отличающиеся высокой удельной прочностью  $\sigma_b/\gamma_0$ , коррозионной и тепловой стойкостью (до 500°), низкой теплопроводностью. Сплавы малопластичны, слабо деформируются, упрочняются в процессе резания, имеют коэффициент обрабатываемости  $K_v = 0,15\text{--}0,45$  в сравнении со сталью 45. Титановые сплавы широко используются для силовых деталей авиадвигателей, дисков и лопаток компрессоров.

## 1.3. КРИТЕРИИ ОБРАБАТЫВАЕМОСТИ МАТЕРИАЛОВ

Обрабатываемость резанием является технологической характеристикой материала, которая определяется комплексом его физико-механических свойств.

При механической обработке обрабатываемость определяют следующими критериями: интенсивностью износа инструмента, характеризуемого допускаемой скоростью резания, величинами возникающей силы резания и температуры, а также получающимся при обработке качеством поверхности. Эти количественные значения обрабатываемости зависят от структуры и механических свойств материала, химического состава, способа получения заготовки и режима ее термообработки [6, 9, 22, 25, 30, 41, 43].

Обрабатываемость данного материала определяется применяемым способом резания, так как один и тот же материал может плохо обрабатываться одним методом резания и хорошо другим. Следовательно, обрабатываемость материала резанием не является его константой; она зависит от комплекса первичных параметров, определяющих протекание физического механизма процесса, и вторичных параметров обработки. Обрабатываемость материала зависит также от вида операции и принимаемого критерия затупления инструмента. Так, например, обрабатываемость лезвийным инструментом может резко отличаться от обрабатываемости абразивным; многие материалы хорошо режутся на черновых операциях и плохо — на чистовых. Затрудненное стружкоотделение на операциях обработки отверстий может оказывать влияние на обрабатываемость резанием данного материала. В соответствии с этим изменяются и критерии обрабатываемости. Так, например, для черновых операций критерием обрабатываемости является интенсивность износа инструмента, для отделочных — шероховатость поверхности или эксплуатационные характеристики поверхностного слоя; для операций глубокого сверления и многих операций, выполняемых на автоматизированном оборудовании — вид образующейся стружки, определяющей удобство ее удаления из зоны резания.

Следовательно, обрабатываемость резанием является комплексным показателем, учитывающим как физическую картину протекания данного процесса резания, так и технологические особенности выполняемой операции. Поэтому количественное выражение обрабатываемости данного материала резанием для определенного метода обработки оценивается показателями жесткости всей технологической системы в целом, а именно станка, технологической оснастки (приспособлений и инструмента) и обрабатываемой заготовки.

Так, применительно к механической обработке заготовок, обрабатываемость материала по критериям «интенсивность износа» и «прочность инструмента» характеризуется количеством обработанных заготовок или объемом срезаемого материала за период стойкости инструмента, определенными в процессе испытаний при стандартных условиях. С точки зрения условий работы станка, обрабатываемость материала оценивается при стандартных условиях критериями, выражаемыми величинами действующими на него сил и потребной на процесс резания мощностью, а также виброустойчивостью станка, простотой его обслуживания. С точки зрения работы приспособления, оценивается необходимое усилие закрепления заготовки, надежность закрепления, виброустойчивость приспособления.

К обрабатываемости материала следует также отнести критерий, характеризующий вид стружки, образующейся при обработке данного материала резанием (сливная или элементная), возможность ее дробления и надежного удаления из зоны резания.

Обрабатываемость материала резанием с точки зрения детали характеризуется ее эксплуатационными характеристиками и прежде всего такими показателями, как точность обработки и качество поверхности.

К числу показателей, определяющих сущность термина «обрабатываемость резанием», относятся:

- › сила резания (крутящий момент вращения) по сравнению с эталонным металлом (сталь 45), измеренная в равных режимных условиях;
- › эффективная мощность, затрачиваемая на резание по сравнению с эталонным металлом в равных режимных условиях;

- › усадка стружки как мера пластической деформации, необходимой для срезания и образования новых поверхностей на стружке и обрабатываемой заготовке;
- › наличие или отсутствие склонности к наростообразованию в равных условиях резания;
- › качество поверхности, обработанной резанием в равных и оптимальных режимных условиях, оцениваемое шероховатостью и остаточным напряжением в поверхностных слоях изготовленной детали;
- › интенсивность изнашивания инструментального материала по сравнению с резанием эталонного металла;
- › теплота, выделяющаяся при деформации материала срезаемого слоя и контактном взаимодействии трущихся поверхностей, а также ее распределение между стружкой, обрабатываемым материалом и инструментом;
- › вид, форма и размеры срезанной стружки, которые определяют ее отвод, хранение и транспортирование;
- › энергозатраты на единицу срезаемого слоя стружки.

При выборе главных критериев обрабатываемости следует рассматривать процесс механической обработки с точки зрения производительности, экономичности и получения необходимого качества обработанной поверхности.

Производительность и экономичность обработки играют решающую роль при черновой и получистовой обработке большинства сталей. Они определяются объемом срезаемого металла или площадью обработанной поверхности в единицу времени при оптимальных геометрии и стойкости инструмента. Для повышения производительности и экономичности необходимо работать при возможно больших глубинах резания, подачах и скоростях, износ доводить до оптимальных значений, применять наиболее интенсивное охлаждение.

Основной критерий обрабатываемости обобщает большинство других критериев. Его обычно выражают скоростным коэффициентом:

$$K_V = \frac{V_{Tx}}{V_{To}},$$

где  $V_{to}$  — скорость резания эталонного материала (сталь 45) при заданном периоде резания;  $V_{tx}$  — скорость резания исследуемого материала при том же периоде резания.

Этот критерий хорошо дополняют, а в некоторых случаях заменяют силы, температура резания, степень деформации стружки, износ инструмента.

При чистовой и получистовой обработке ответственных деталей под закалку или под окончательную обработку решающее значение приобретает качество обработанной поверхности, корреляционно связанное с износостойкостью и коррозионной устойчивостью, усталостной прочностью, трещинообразованием и проч. Данный вид обработки должен обеспечить получение поверхностного слоя детали с определенными макро- и микрорельефом, глубиной и степенью наклепа, благоприятными остаточными напряжениями. В зависимости от назначения и условий работы детали, решающим может быть один или несколько параметров в комплексе. Чаще всего качественный критерий не совпадает с критерием производительности. Это приводит к значительному понижению режимов резания, назначению не оптимальных по стойкости геометрических параметров инструмента, а также к отказу от применения смазывающе-охлаждающих технологических жидкостей (СОТЖ).

Следовательно, при оценке обрабатываемости материалов, используемых для изготовления ответственных деталей, следует рассматривать в комплексе возможность производительной обработки и получения необходимого качества обработанной поверхности.

Основным направлением улучшения обрабатываемости заготовок деталей машин является разработка методов резания, с одной стороны, значительно усиливающих воздействие на материал срезаемого слоя или качественно его изменяющих и, с другой стороны, создающих наиболее благоприятные условия для работы инструмента. Сопоставление количественных оценок обрабатываемости, например стойкости инструмента, допустимо лишь при соблюдении равных условий резания, типичных для сравниваемых групп конструкционных и инструментальных материалов.

Повышению эффективности обработки заготовок в машиностроении, особенно из изготовленных из специальных труднообрабатываемых материалов, способствует создание специальных и комбинированных методов обработки.

#### **1.4. ОБРАБАТЫВАЕМОСТЬ МАТЕРИАЛОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИХ СОСТАВА И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ**

Физико-механические свойства высокопрочных и жаропрочных материалов оказывают решающее влияние на их обрабатываемость с точки зрения производительности, а также во многом определяют возможность получения поверхностного слоя того или иного качества при различных видах обработки резанием.

Наибольшее значение имеют прочность (твердость), пластичность, ударная вязкость, теплопроводность [9, 13, 25, 30, 38, 41, 42, 43, 59].

С увеличением предела прочности  $\sigma_B$  и твердости  $HB$  возрастают силы деформации и трения, удельное давление резания и температуры, а в связи с этим повышается интенсивность износа, ухудшается обрабатываемость материала. Поэтому при сравнительной оценке обрабатываемости материалов по скорости часто используют зависимости вида:

$$K_V = \left( \frac{\sigma_{BO}}{\sigma_{BX}} \right)^x \text{ или } K_V = \left( \frac{HB_O}{HB_X} \right)^y,$$

где  $\sigma_{BO}$  и  $HB_O$  — характеристики эталонного материала (например, стали 45, 1Х18Н9Т);  $\sigma_{BX}$  и  $HB_X$  — применяемого.

При повышении пластических свойств обрабатываемого материала (увеличение  $\delta\%$ ,  $\psi\%$ , уменьшение отношения  $\frac{\sigma_o}{\sigma_B}$ ) увеличиваются в процессе резания работа (степень) деформации, тепловыделение, возрастают силы и температура. На поверхности резания появляется сильно упрочненный (наклепанный) слой металла, который дополнительно осложняет процесс резания, особенно при обработке жаропрочных материалов, имеющих высокую прочность в исходном состоянии. Поэтому более общими показателями обрабатываемого материала, учитывающими прочность и пластичность, являются истинный предел прочности при растяжении  $S_K = \sigma_B(1 + \delta)$  и условный предел текучести  $\sigma_0$  (или  $\sigma_{ист} \approx 1,15\sigma_B$ ), получаемый по диаграммам сжатия образцов в координатах  $\sigma_{ист} = h_0/h_x$  [13, 20, 38, 48, 54].

Последний показатель по физической сущности более реален, так как в процессе резания напряженное состояние и характер деформации срезаемого слоя более близки к условиям, возникающим при сжатии образцов. Очень важна способность жаропрочных материалов сохранять исходную прочность и твердость при высоких температурах (до 500–900°). Прочность и твердость режущих материалов при обработке этих сплавов уменьшается, что и обуславливает ухудшение их обрабатываемости. Повышение прочности и пластичности материала, как правило, затрудняет получение малой шероховатости обработки и хорошего рельефа, способствует повышению наклепа подповерхностного слоя и формированию более высоких и неблагоприятных растягивающих остаточных напряжений. Это обусловлено более высокими силами и температурами в зоне резания, более высокой упрочняемостью и неравномерностью пластических деформаций срезаемого слоя, вызывающими вибрациями, очень быстрый и значительный износ в самом начале резания, образование нароста и наволакивание материала на обработанную поверхность.

Очень важным показателем является также и теплопроводность. Чем выше теплопроводность  $\lambda$ , тем больше тепла из зоны контакта инструмента уходит в стружку и изделие, тем ниже температура резания и выше стойкость. При примерно равных прочностных и пластических характеристиках обрабатываемых материалов коэффициент обрабатываемости по скорости резания можно определить по формуле

$$K_V = \left( \frac{\lambda_X}{\lambda_0} \right)^x,$$

где  $\lambda_0$  и  $\lambda_X$  — коэффициенты теплопроводности эталонного и исследуемого материалов;  $x = 0,45–0,55$  — показатель степени, найденный экспериментальным путем [43].

Если учитывать одновременно предел прочности  $S_k$  и коэффициент теплопроводности  $\lambda$ , то можно записать:

$$K_V = \left( \frac{\lambda_X}{\lambda_0} \right)^x \cdot \left( \frac{\sigma_{BO}}{\sigma_{BX}} \right)^{1,8} \cdot \left( \frac{1 + \delta_0}{1 + \delta_X} \right)^{1,8}.$$

Увеличение теплоемкости и плотности материала способствует большему поглощению тепла и снижению температуры резания, улучшению обрабатываемости.

Большое влияние на обрабатываемость оказывают химический состав и структурное состояние материалов. Обычно увеличение содержания легирующих элементов в сплаве ухудшает их обрабатываемость. На обрабатываемость жаропрочных и нержавеющих сплавов наибольшее влияние оказывают С, Al, Ti, Si, несколько меньшее — Mo, Co, Mn, W, и еще меньшее — Cr, Ni. Введение в сплав С, Al, Ti ухудшает обрабатываемость в связи с образованием на их основе мелкодисперсных фаз, упрочняющих твердые растворы сплава.

Углерод является основным элементом в сталях. Его влияние особенно велико при содержании С > 0,15%, а также при закалке или нормализации. Обрабатываемость таких сталей может быть улучшена отжигом или отпуском, обеспечивающими выделение и коагуляцию карбидов. Обрабатываемость малоуглеродистых (С < 0,15%) аустенитных сталей обычно мало изменяется при закалке.

Алюминий и титан являются основными легирующими элементами в сплавах на железоникелевой и никелевой основах. Они образуют с никелем мелкодисперсные интерметаллидные соединения. При закалке эти соединения обычно растворяются, и обрабатываемость сплавов улучшается; при отпуске и отжиге они выделяются, и обрабатываемость ухудшается.

Наличие интерметаллидных, карбидных включений, окислов, нитридов (для титановых сплавов) также снижает обрабатываемость вследствие их высокой микротвердости и большой истирающей способности. Они воздействуют на инструмент подобно абразиву и вызывают ускоренный износ, особенно в сочетании с высокими температурами и силами ( $T = 600\text{--}900^\circ$ ), возникающими при обработке жаропрочных материалов. Много аналогичных включений содержат литые жаропрочные сплавы (ЭИ766, ЖС6К и др.), литейные и поковочные корки. Поэтому обработка литейных сплавов по корке производится на значительно более низких режимах, чем без корки.

Учитывая рассмотренное выше влияние физико-механических и химических свойств материала на его обрабатываемость, можно выбирать те или иные методы обработки, марку инструмента, его геометрию и режимы резания.

#### **Подведем итог.**

1. Основным критерием оценки обрабатываемости большинства материалов при черновой обработке является скоростной коэффициент  $K_v$ . В некоторых случаях он может быть заменен силами резания, температурой, степенью деформации стружки, износом инструмента. При получистовой и чистовой обработке ответственных заготовок решающее значение приобретают качественные характеристики обработанной поверхности: шероховатость, макро- и микрорельеф, глубина и степень наклена, остаточные напряжения, оказывающие большое влияние на циклическую прочность, износостойкость, коррозионную устойчивость и др.

2. Физико-механические свойства и состав материала оказывают решающее влияние как на количественные, так и на качественные показатели обрабатываемости. С увеличением прочности, пластичности, ударной вязкости, коэффициента линейного расширения и уменьшением теплопроводности при нормальных и высоких температурах с повышением процентного содержания легирующих элементов (углерода, алюминия, титана, кремния и др.) обрабатываемость материалов ухудшается.

## **1.5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ НАСЛЕДСТВЕННОСТЬ**

Значительное влияние качества поверхности деталей машин на их основные эксплуатационные свойства, а метода и режимов механической обработки — на отдельные характеристики качества поверхности (высоту шероховатости, форму неровностей, направление неровностей, микротвердость поверхностного слоя и глубину распространения наклена, величину, знак и глубину распространения остаточных напряжений) предопределяют зависимость эксплуатационных качеств деталей от технологии их механической обработки.

Как известно, важные эксплуатационные качества деталей (долговечность, плавность перемещений, длительность сохранения заданных конструктором точности и посадки, прочность, коррозионная стойкость, магнитные свойства, способность к теплопередаче и теплоизлучению и др.) зависят не только от кон-

структурных форм и точности изготовления деталей, состава и структуры их материала и его механических качеств, но и от отдельных характеристик качества поверхности, приобретенных металлом поверхностного слоя в процессе механической обработки.

Изменение методов и режимов механической обработки оказывает воздействие на отдельные характеристики качества поверхности, а соответственно, и на эксплуатационные свойства деталей.

В этом случае уместно говорить о существовании технологической наследственности качества поверхности и определяемых им эксплуатационных свойств деталей от отдельных технологических операций и всего технологического процесса их изготовления.

Технологической наследственностью следует называть изменение эксплуатационных свойств деталей машин под влиянием технологии их изготовления [18, 20, 22, 31, 34, 45, 53, 61].

Под технологией изготовления деталей при этом подразумевают методы и режимы обработки, примененные на отдельных операциях, вид и состояние режущего инструмента, условия охлаждения, размеры операционных припусков, последовательность и содержание операций технологического процесса в целом.

Технологическая наследственность зависит не только от методов и режимов обработки, примененных на чистовой операции. Она может проявиться в изменении свойств или потере точности формы готовой детали при ее эксплуатации в результате воздействия тех или иных элементов качества поверхности, созданных в поверхностном слое детали при ее черновой обработке.

Влияние предыдущей обработки наблюдается при короблении лопаток паровых турбин во время их эксплуатации при высоких температурах, вызывающих релаксацию остаточных напряжений, возникших при фрезеровании, строгании или шлифовании лопаток и не устранивших заключительным полированием.

Проявление технологической наследственности может привести как к улучшению, так и к ухудшению эксплуатационных свойств деталей машин. Для целесообразного использования явления технологической наследственности необходимо установить непосредственные связи между эксплуатационными характеристиками деталей (усталостной прочностью, износостойкостью и др.) и режимами обработки заготовок при основных методах их изготовления [31, 32, 57].

Во многих случаях такие связи можно выявить с помощью математических зависимостей «качество поверхности — функция режима резания поверхности» с их последующим совместным решением и установлением прямой связи («эксплуатационная характеристика — режим резания»). Последнюю зависимость можно непосредственно использовать для расчетов режимов резания, обеспечивающих достижение заданных конструктором эксплуатационных характеристик.

Иногда установление связи эксплуатационных свойств с режимами обработки через зависимости качества поверхности от режимов, эксплуатационных свойств — от качества поверхности становится затруднительным в связи с различным направлением изменения отдельных характеристик качества поверхности, влияющих на эксплуатационные свойства, при изменении режимов резания. Например, при увеличении глубины круглого шлифования углеродистой стали возрастает как высота шероховатости поверхности, снижающая износосто-

Конец ознакомительного фрагмента.  
Приобрести книгу можно  
в интернет-магазине  
«Электронный универс»  
[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)