

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Омский государственный технический университет»

С. Б. Скобелев

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА

*Учебное текстовое электронное издание
локального распространения*

Омск
Издательство ОмГТУ
2017

УДК 621(075)

ББК 34.5я73

С44

Рецензенты:

Д. В. Тарута, канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологии промышленности» Сибирского казачьего института технологий и управления, филиал МГУТУ;

Г. Г. Бурый, канд. техн. наук, ст. преподаватель кафедры «Автомобили, конструкционные материалы и технологии» ФГБОУ ВО «СибАДИ»

Скобелев, С. Б.

С44 Технологическое обеспечение качества : конспект лекций / С. Б. Скобелев ; Минобрнауки России, ОмГТУ. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2017.

ISBN 978-5-8149-2370-7

Рассмотрены показатели качества машины и деталей машин, проведен анализ причин снижения качества на каждой стадии производства, представлены методы повышения качества изделий в машиностроительном производстве.

Для магистрантов, обучающихся по направлению подготовки 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств».

УДК 621(075)

ББК 34.5я73

*Рекомендовано редакционно-издательским советом
Омского государственного технического университета*

ISBN 978-5-8149-2370-7

© ОмГТУ, 2017

1 электронный оптический диск

Оригинал-макет издания выполнен в Microsoft Office Word 2007 с использованием возможностей Adobe Acrobat X.

Минимальные системные требования:

- процессор Intel Pentium 1,3 ГГц и выше;
- оперативная память 256 Мб;
- свободное место на жестком диске 260 Мб;
- операционная система Microsoft Windows XP/Vista/7;
- разрешение экрана 1024×576 и выше;
- акустическая система не требуется;
- дополнительные программные средства Adobe Acrobat Reader 5.0 и выше.

Редактор *О. В. Маер*
Компьютерная верстка *Л. Ю. Бутаковой*

Сводный темплан 2017 г.
Подписано к использованию 25.01.17.
Объем 1,83 Мб.

Издательство ОмГТУ.
644050, г. Омск, пр. Мира, 11; т. 23-02-12
Эл. почта: info@omgtu.ru

ВВЕДЕНИЕ

Качество продукции машиностроения – понятие многоплановое. Оно включает качество выполнения работ на каждом этапе изготовления машины: качество конструкторских решений на этапе проектирования, организацию производственного процесса изготовления машины, изготовление деталей требуемой точности и качества, качество сборки узлов и агрегатов, а также контроль качества продукции.

Качество машины зависит от качества деталей, из которых она состоит, а именно от точности их размеров и состояния поверхностного слоя. Добиться необходимых показателей точности и требуемого качества поверхностного слоя можно методами механической обработки (точение, фрезерование, сверление и др.), термической обработки (закалка, отпуск, отжиг, нормализация), химико-термической обработки (цементация, нитроцементация, азотирование, цианирование) и способами поверхностно-пластического деформирования – ППД (накатывание и раскатывание, дробеструйная и ударно-акустическая обработка).

Как известно, в более 80 % случаев причиной выхода из строя машин является износ их рабочих поверхностей. Поэтому, решая проблему технологического обеспечения качества машин, необходимо разрабатывать такие технологические процессы, которые обеспечивают повышение износостойкости деталей пар трения, а также заданную точность обработки.

В данном конспекте лекций большое внимание уделено именно технологическим методам повышения износостойкости рабочих поверхностей деталей машин, применению рациональных режимов различных методов обработки, при которых повышаются антифрикционные свойства поверхностного слоя. Изложены также основные показатели качества машин и рассмотрены вопросы оптимального качества, описана зависимость качества машины от технологии ее изготовления.

При изучении дисциплины «Технологическое обеспечение качества» параллельно с освоением дисциплины «Технология поверхностного упрочнения» у магистрантов формируются представления о методиках технологического обеспечения качества и о влиянии методов обработки заготовок на показатели качества деталей машин.

1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ КУРСА

ЛЕКЦИЯ 1. КАЧЕСТВО ИЗДЕЛИЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Этапы создания машины, основные показатели качества машины, показатели технологичности, понятие оптимального качества, показатели качества и экономичности машины, зависимость качества машины от технологии ее изготовления

Служебное назначение машины

Качество машиностроительной продукции является обобщающим показателем научно-технического прогресса и культуры производства в машиностроении. Проблема качества машиностроительной продукции приобретает особое значение в связи с необходимостью повышения конкурентоспособности отечественной продукции на мировом рынке.

Обеспечение и повышение качества изделий машиностроения – задача многоплановая. Она решается путем совершенствования конструкции машин, их деталей и узлов, применения новых конструкционных материалов, автоматизации технологических процессов, разработки методов нанесения защитных покрытий и т. п. Особую роль в проблеме обеспечения качества машиностроительной продукции играет технология машиностроения, так как именно через нее реализуются новые прогрессивные конструкторские разработки.

Технология машиностроения – это отрасль науки о закономерностях процессов изготовления машин требуемого (заданного) качества, в установленном количестве и сроки при минимальных затратах живого и овеществленного труда, материальных и энергетических ресурсов. Из приведенного определения следует, что первой и главной задачей технологии машиностроения является обеспечение заданного качества изделий при изготовлении. Одним из наиболее эффективных направлений в решении этой проблемы является технологическое обеспечение оптимальных для заданных условий эксплуатации параметров состояния поверхностного слоя, точности изготовления деталей и сборки машин.

В процессе эксплуатации поверхностный слой детали подвергается наиболее сильному физико-химическому и механическому воздействию. Поэтому разрушение деталей (усталостное, абразивный износ, эрозия, коррозия, кавитационный износ и др.) в большинстве случаев начинается с поверхности [6].

Таким образом, решая проблему технологического обеспечения качества деталей, необходимо разрабатывать такие технологические процессы, которые обеспечивают требуемые характеристики состояния их поверхностного слоя, определяемые условиями работы детали, а также заданную точность обработки.

В природе существует ничтожно малое количество предметов, которые может использовать человек непосредственно без преобразования. Поэтому человеку приходится приспособлять предметы природы для удовлетворения своих потребностей.

Современный человек стремится преобразовывать предметы природы с помощью машин.

Человеческое общество постоянно испытывает потребности в новых видах продукции либо в сокращении затрат труда при изготовлении освоенной продукции. Эти потребности могут быть удовлетворены с помощью новых технологических процессов и новых машин. Таким образом, стимулом к созданию новой машины всегда является новый технологический процесс [8].

Создавая машину, человек ставит перед собой две задачи:

- 1) создать машину качественной;
- 2) затратить меньшее количество труда при создании машины.

Замысел новой машины возникает при разработке технологического процесса изготовления продукции, в производстве которой возникла потребность. Этот замысел выражается в формулировке служебного назначения, которое является исходным документом для проектируемой машины.

Процесс создания машины состоит из двух этапов:

- 1) проектирование;
- 2) изготовление.

В результате проектирования появляются чертежи машины, в результате изготовления (с помощью производственного процесса) – машина.

Второй этап и составляет основную задачу технологии машиностроения. Процесс создания машины можно представить в виде схемы (рис. 1.1) [8].

Каждая машина создается для удовлетворения определенной потребности человека, которая находит отражение в служебном назначении машины. Для того чтобы выпускаемая заводом машина выполняла свое слу-

жебное назначение, оно должно быть сформулировано прежде, чем начнется ее создание.

Служебное назначение машины – максимально уточненная и четко сформулированная задача, для решения которой предназначена машина.

Опыт машиностроения показывает, что каждая ошибка, допущенная при выявлении и уточнении служебного назначения машины и её механизмов, не только приводит к созданию недостаточно качественной машины, но и влечет за собой лишние затраты труда на её изготовление и эксплуатацию, а также увеличение сроков её освоения.

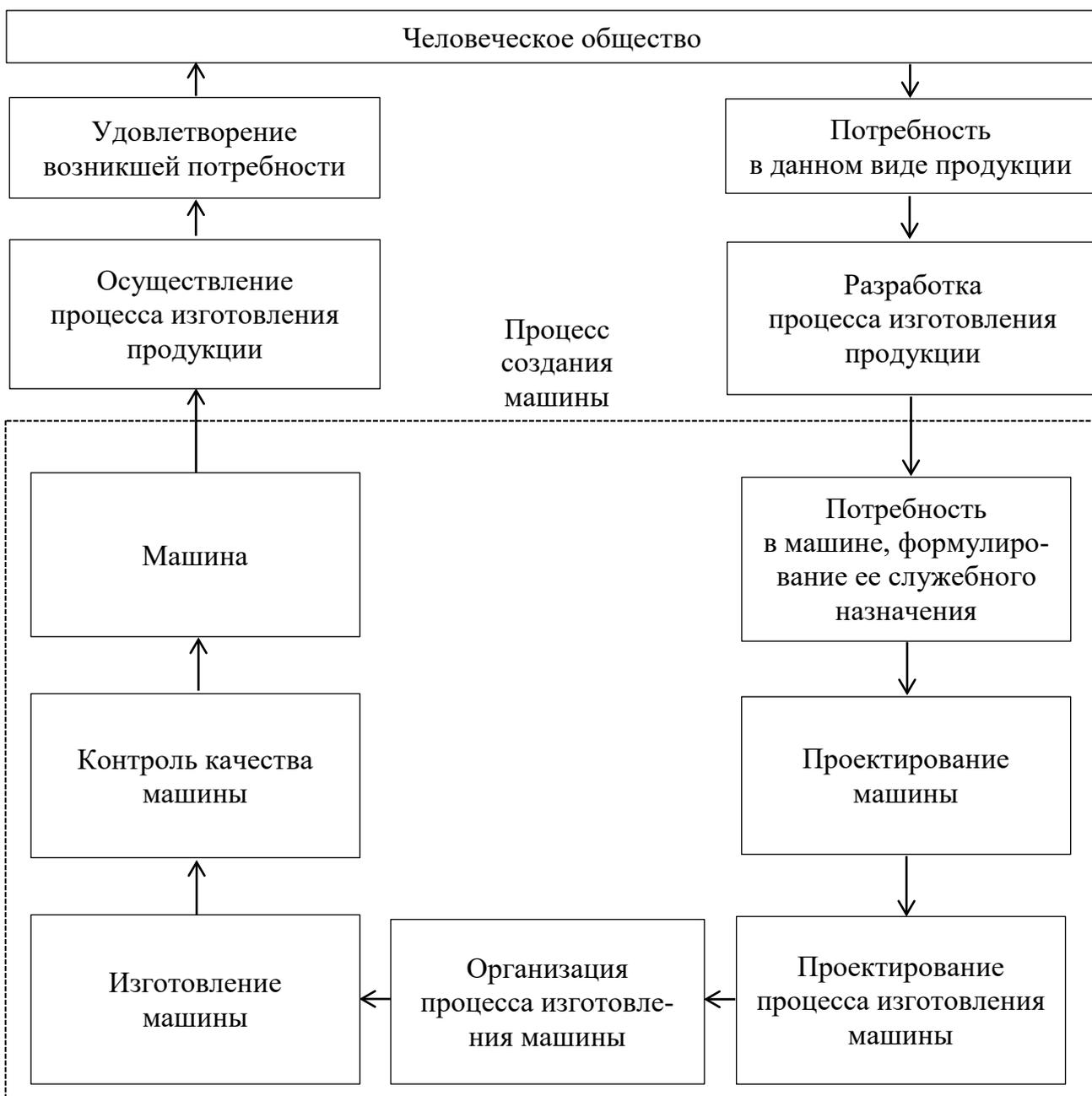


Рис. 1.1. Этапы создания машины

Нередко недостаточно глубокое изучение и выявление служебного назначения машины порождает излишне жесткие, экономически неоправданные требования к точности размеров и другим показателям машины [9].

Формулировка служебного назначения машины должна содержать подробные сведения, конкретизирующие общую задачу и уточняющие условия, при которых эта задача может быть решена.

Показатели качества машины

Под *качеством* машины понимают совокупность ее свойств, обуславливающих способность выполнять свое служебное назначение. От качества зависит экономическая эффективность использования новой техники. Качество машин закладывается в их конструкцию при проектно-конструкторских разработках и обеспечивается на заданном уровне в производстве, а также поддерживается в течение необходимого времени в процессе эксплуатации [8].

Показатели качества машины можно разделить на три группы:

- *эксплуатационные*;
- *производственно-технологичные* – характеризуют технологичность машины;
- *экономические* – капиталовложения в производство, себестоимость изготовления машины и единицы продукции, изготавливаемой машиной, которые в большой степени зависят от технологии изготовления машин.

К наиболее важным показателям качества относятся эксплуатационные: технический уровень машины, ее надежность, эргономические и эстетические характеристики. Причем технический уровень (мощность, точность работы, КПД, производительность и т. д.) определяет степень совершенства машины. Она оценивается в абсолютных и относительных единицах.

Технический уровень машины зависит как от ее конструкции, так и от технологии изготовления. Основным эксплуатационным показателем качества машины является ее надежность – комплексное свойство, которое включает безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость (свойство машины сохранять исправное и работоспособное состояние в течение определенного промежутка времени) [8].

Исходя из целей оценки и с учетом значимости показателей качества, указанных в документах для данного вида машин, устанавливается но-

менклатура показателей качества. При этом учитываются международные, национальные зарубежные и отечественные стандарты, документация на поставку машин, каталоги, проспекты и стандарты фирм-изготовителей данного вида машин, патентная, конкурентная и экономическая документация. Номенклатура показателей качества бывает трех видов: типовая, развернутая, конкретная.

Типовая номенклатура – это полный перечень всех групп и конкретных показателей качества, относящихся к изделиям производственного назначения или к промышленным изделиям бытового назначения.

Развернутая номенклатура показателей качества составляется и используется для оценки качества машин одного названия, с одинаковыми или близкими функциями, похожими параметрами свойств, которые включают всю совокупность комплексных и единичных показателей, характеризующих качество данной группы машин.

Конкретная номенклатура – это наиболее детальная и полная номенклатура показателей качества для одного типа машин или нескольких видов однотипных машин. Она позволяет достоверно оценивать качество машин с учетом всех характерных признаков [6].

После установления номенклатуры показателей качества формируются группы аналогов машин и устанавливаются базовые образцы, отражающие передовые научно-технические достижения в изделиях данного вида. Оценка уровня качества машин (изделий) ведется по группам показателей, которые характеризуют специфические свойства изделия. Такими группами показателей являются: 1) назначение; 2) надежность; 3) экономное использование сырья, материалов, топлива, энергии; 4) технологичность; 5) транспортабельность; 6) эргономичность; 7) экологичность; 8) безопасность; 9) стандартизация и унификация; 10) эстетичность; 11) патентно-правовые; 12) экономические.

Показатели технологичности

Технологичность конструкции – это совокупность свойств конструкции изделия, проявляемых в возможности оптимизации затрат труда, материальных и финансовых средств, времени и других ресурсов при технологической подготовке производства, изготовлении, эксплуатации и ремонте.

На стадии разработки технического задания и эскизного проекта изделия устанавливаются базовые показатели технологичности конструкции, по которым сравниваются показатели технологичности на всех этапах проектирования. Для определения базовых показателей используют статистические данные о ранее созданных конструкциях, имеющих сходные конструктивно-технологические признаки.

Отработка конструкции изделия на технологичность на стадии эскизного и технического проекта предусматривает выбор наиболее рациональной конструктивной схемы и компоновки сборочных единиц, выбор рациональных способов соединения, унификацию сборочных единиц и основных деталей, выбор материала и вида заготовок, обеспечение технологичности основных деталей и определение возможностей применения типовых технологических процессов [6].

На стадии разработки рабочей конструкторской документации окончательно дорабатываются все вопросы технологичности конструкции каждой детали и всего изделия в целом. Особое внимание обращается на выбор технологических баз и согласование их с конструкторскими базами, корректную простановку размеров и допусков, правильное оформление геометрических элементов конструкции, обеспечивающих выполнение требований по технологичности при механической обработке, максимальную унификацию элементов конструкций: резьб, шпонок, шлицевых соединений, центровых отверстий, диаметров т. п. [6].

При подготовке к серийному выпуску проверяется технологичность заготовок и основных деталей с учетом применяемого технологического оборудования, оснастки и технологических процессов изготовления, сборки и испытания.

Оценка технологичности конструкции может быть качественная и количественная. Показатели технологичности конструкции, требования к ним и методы определения установлены ГОСТ 14.801-83 и ГОСТ 14.205-83. Показатели могут быть абсолютными и относительными. Численное значение абсолютных показателей характеризует один или несколько признаков технологичности конструкции. Относительные показатели дают сравнительную характеристику технологичности конструкции, т. е. это удельные показатели, которые отражают признаки технологичности конструкции по

отношению к основным показателям машины. Различают частные, комплексные и базовые показатели технологичности. Очень важен правильный выбор базовых показателей, состав и оптимальные значения которых регламентируются техническим заданием на изделие.

Базовые показатели устанавливаются на основании статистических данных по аналогичным показателям ранее созданных конструкций, которые имеют общие конструкторско-технологические признаки с создаваемой машиной. Оценка технологичности конструкции производится по группам показателей. Для машин таких групп показателей 12, которые включают в себя 66 более конкретных показателей [1].

Под *производственной технологичностью конструкции* понимается совокупность свойств конструкции, обеспечивающих заданные эксплуатационные характеристики при наименьшей трудоемкости и стоимости изготовления, а также возможность применения наиболее прогрессивных методов и средств производства. Технологичность конструкции машины *применительно к изготовлению деталей* характеризуется количеством обрабатываемых деталей и поверхностей (чем меньше, тем технологичнее); геометрической точностью деталей (чем выше точность, тем больше трудоемкость обработки и ниже технологичность); жесткостью детали (чем выше жесткость, тем технологичнее деталь); обрабатываемостью материала детали; степенью стандартизации и унификации деталей и их элементов; возможностью совмещения переходов при изготовлении; возможностью использования эффективных методов получения заготовок и их обработки.

Технологичность машины *применительно к ее сборке* характеризуется числом деталей в машине; степенью унификации крепежных изделий, от которой зависит номенклатура сборочного инструмента; числом звеньев в размерных цепях (чем больше звеньев, тем труднее обеспечить заданную точность замыкающего звена); методом достижения точности замыкающего звена (наиболее эффективен метод полной взаимозаменяемости и регулирования); наличием базовой детали; возможностью одновременного и независимого монтажа узлов и деталей; свободным доступом для монтажа всех деталей, подвода механизированного инструмента к местам соединения деталей [1].

Понятие оптимального качества

Существует понятие оптимального качества. Оно определяется из сопоставления затрат у изготовителя на повышение качества Q_u с затратами на эксплуатацию потребителем изделия более высокого качества:

$$Q_u = Q_{\Pi} + Q_{\text{H}}, \quad (1.1)$$

где Q_{Π} – постоянные затраты на изготовление; Q_{H} – переменные затраты на изготовление для обеспечения уровня надежности $P(t)$.

Затраты на эксплуатацию определяются по зависимости:

$$Q_y = Q_0 \left(\frac{T_3}{T_0} \right)^a, \quad (1.2)$$

где Q_0 – цена надежности базового варианта (аналога); T_0 – срок службы аналога; T_3 – срок службы нового изделия; $a = 0,5 \dots 1,5$ – эмпирический показатель, характеризующий уровень прогрессивности конструкции и производства.

Если качество характеризовать вероятностью безотказной работы или коэффициентом надежности $P(t)$, где t – время работы машины, то зависимость затрат на изготовление и эксплуатацию от коэффициента надежности $P(t)$ будет иметь вид, показанный на рис. 1.2.

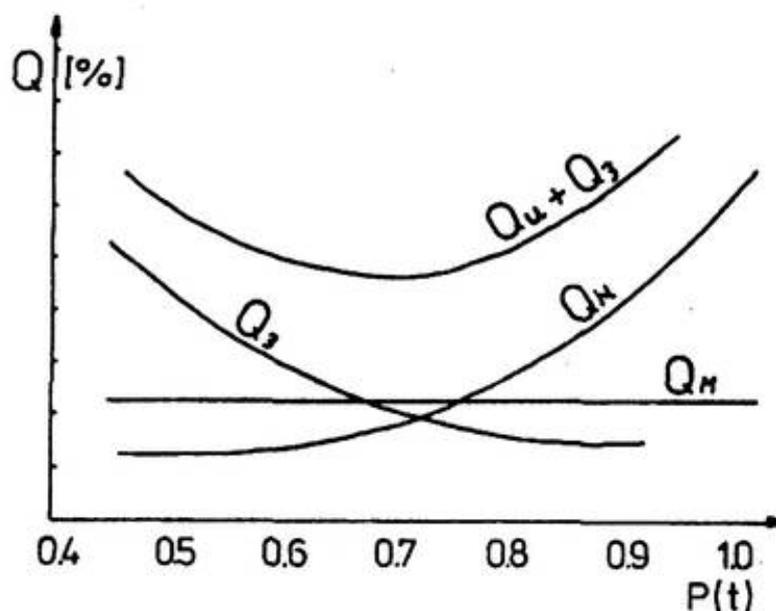


Рис. 1.2. Зависимость затрат на изготовление и эксплуатацию от коэффициента надежности $P(t)$

Большое значение в обеспечении стабильного высокого качества продукции имеют стандартизация и сертификация. Они устанавливают оптимальные показатели качества, его параметрические ряды, правила контроля и испытаний, режимы технического обслуживания, методы и сроки ремонтов и т. п.

Наиболее важными характеристиками качества изделия с точки зрения технологии его изготовления являются точность и состояние поверхностного слоя деталей [1].

На каждое разрабатываемое изделие составляют технические условия (ТУ) – документ, входящий в комплект технических требований к изделию; правила приемки и поставки изделия; методы контроля; условия эксплуатации, транспортирования и хранения. Управление качеством продукции осуществляется путем систематического контроля соответствия показателей качества стандартам, техническим условиям и другой нормативно-технической документации, а также целенаправленным воздействием на качество документации, оборудования, инструмента, материалов, полуфабрикатов, комплектующих изделий и на уровень квалификации изготовителей [6].

Качество и экономичность машины

Качество машины зависит не только от совершенства ее конструкции, но и от уровня технологии ее производства. Чем выше качество машины, тем совершеннее должна быть ее технология изготовления. Важным составляющим элементом понятия качества машины является точность (рис. 1.3) [8].

Проектирование машины, ее изготовление, эксплуатация, техническое обслуживание и ремонт связаны с конкретными затратами труда и материалов, энергии, технических средств. Все затраты образуют стоимостное свойство машины – ее экономичность \mathcal{E} , определяемую по формуле

$$\mathcal{E} = \frac{Z_{\text{пр}} + Z_{\text{изг}} + Z_{\text{э}} + Z_{\text{т.о}} + Z_{\text{рем}}}{N}, \quad (1.3)$$

где $Z_{\text{пр}}$ – затраты на проектирование; $Z_{\text{изг}}$ – затраты на изготовление; $Z_{\text{э}}$ – затраты на эксплуатацию; $Z_{\text{т.о}}$ – затраты на техническое обслуживание;

$Z_{\text{рем}}$ – затраты на ремонт; N – количество продукции, произведенной машиной за ее срок службы.

Показатели качества отражают степень пригодности, полезности, те блага, которые извлекает человек, используя машину.

Экономичность – цена этих благ, их стоимость. Она зависит от технического совершенства конструкции машины и технологии ее изготовления.

Стоимость машины зависит от качества, количества и стоимости материалов, выбранных конструктором в процессе проектирования. Конечные затраты на материалы, входящие в себестоимость, можно определить лишь после осуществления технологического процесса ее изготовления.

Уровень унификации и технологичности машины определяет конструктор. Влияние этих факторов на себестоимость машины проявляется не прямым путем, а через технологию ее изготовления. Эти же факторы оказывают влияние на затраты по техническому обслуживанию и ремонту [8].

Зависимость качества машин от технологии их изготовления

На качественные характеристики поверхностей деталей при механической обработке влияет большое число значимых факторов, а именно:

- метод изготовления;
- режимы обработки;
- физико-механические свойства материала детали;
- способ охлаждения и свойства смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ);
- исходная шероховатость обрабатываемых поверхностей;
- характеристики материала инструмента (абразивный и лезвийный);
- геометрия заточки инструмента;
- техническое состояние оборудования и средств оснащения;
- факторы технологической наследственности.



Рис. 1.3. Совокупность свойств, определяющих качество и экономичность машины

Сложность конкретного анализа влияния перечисленных факторов на качественные характеристики поверхностей при каждом методе обработки различна. В общем случае можно установить, что основные качественные характеристики поверхностей деталей зависят от степени пластического деформирования поверхностного слоя металла в процессе обработ-

ки и температуры в зоне резания. Чем выше степень пластического деформирования, тем больше наклеп металла и тем выше микротвердость и остаточные напряжения (сжимающие) в поверхностном слое деталей. Эта зависимость четко прослеживается при методах обработки деталей, основанных на пластическом деформировании (выглаживающие и обкатные методы) и других низкотемпературных методах обработки.

Вместе с тем, если в зоне резания при обработке имеет место температура, равная $(0,25...0,3) \cdot T_{пл}$ ($T_{пл}$ – температура плавления металла), то происходит разупрочнение поверхностного слоя. Температурный фактор и пластическое деформирование оказывают влияние не только на физико-механические характеристики поверхностного слоя, но и на шероховатость поверхности при обработке. Под действием высоких температур поверхностный слой металла размягчается и увлекаемый шлифовальным кругом размазывается по поверхности. Обработочные риски при этом покрываются ровным однородным слоем металла [8].

Качественные характеристики поверхностей деталей формируются не только на финишных операциях, но и в процессе выполнения всего комплекса технологических операций по изготовлению детали. В связи с этим на качество поверхностей деталей оказывает влияние и технологическая наследственность от предшествующих операций процесса обработки. Рассматривая технологию изготовления деталей с позиций технологической наследственности, принимают во внимание методы и режимы обработки, применяемые на отдельных операциях, характеристики режущего инструмента, вид и условия применения СОЖ, размеры операционных припусков, последовательность операций всего технологического процесса.

Под *технологической наследственностью* понимается явление переноса свойств обрабатываемого объекта от предшествующих операций к последующим, оказывающим влияние на эксплуатационные характеристики деталей машин.

Проявление влияния технологической наследственности может привести как к улучшению, так и к ухудшению эксплуатационных свойств деталей машин. В связи с этим весьма важно знать, какие качественные характеристики поверхностного слоя формируются после каждой опера-

ции технологического процесса, какова их наследственная роль и как они влияют на эксплуатационные свойства деталей. Знание этих вопросов позволяет целесообразно использовать технологическую наследственность и эффективно обеспечивать необходимые качественные характеристики деталей машин при их изготовлении.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое служебное назначение машины? Назовите этапы создания машины.
2. Назовите основные показатели качества машины.
3. Какие показатели технологичности вы знаете?
4. Что в себя включает понятие оптимального качества?
5. Назовите показатели качества и экономичности машины.
6. В чем заключается зависимость качества машины от технологии ее изготовления?

ЛЕКЦИЯ 2. КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Состав поверхностного слоя детали, геометрические параметры микронеровностей, параметры шероховатости, виды микропрофиля поверхности, поперечная и продольная шероховатость, характеристики физического состояния поверхностного слоя, влияние качества поверхности на эксплуатационные свойства деталей машин

Характеристики качества поверхностного слоя деталей машин

Поверхностный слой детали – наружный слой детали с измененной структурой, фазовым и химическим составом по сравнению с основным металлом, из которого изготовлена деталь. Внешняя поверхность этого слоя граничит с окружающей средой или с сопряженной деталью. Схема поверхностного слоя (ПС) представлена на рис. 1.4 [1].

Поверхностный слой детали можно разделить на несколько зон.

Зона 1 (толщина 1...102 нм) состоит из адсорбированных из окружающей среды молекул и атомов органических и неорганических веществ (воды, промывочной или смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) и др.).

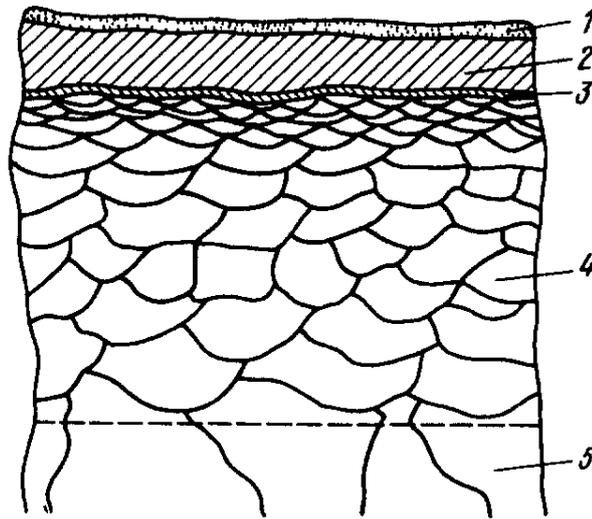


Рис. 1.4. Схема поверхностного слоя детали

Зона 2 (толщина 1...10 мкм) состоит из продуктов химического взаимодействия металла с окружающей средой (обычно оксидов).

Зона 3 (толщиной в несколько межатомных расстояний); металл в этой зоне имеет иную, чем в объеме, кристаллическую и электронную структуру.

Зона 4 (толщиной около 10...150 мкм и более) с измененной структурой, фазовым и химическим составом возникает при изготовлении детали и изменяется в процессе эксплуатации.

Зона 5 – основной металл.

Толщина и состояние указанных слоев поверхностного слоя могут изменяться в зависимости от состава материала, метода обработки условий эксплуатации. Оценка этого состояния осуществляется методами химического, физического или механического анализа [1].

Для оценки качества поверхностного слоя разработана следующая классификация параметров:

- 1) геометрические параметры неровности поверхности;
- 2) физическое состояние;
- 3) химический состав;
- 4) механическое состояние.

Геометрические параметры микронеровностей оцениваются параметрами шероховатости, волнистости и погрешности формы. Геометрические параметры условно подразделяются на микрогеометрические (шероховатость) и макрогеометрические (волнистость, погрешность формы).

Макрогеометрические отклонения от правильной геометрической формы (собственно погрешности формы) – это единичные, на протяжении всей рассматриваемой поверхности, отклонения от идеальной геометрической формы поверхности: овальность, конусность, бочкообразность (рис. 1.5). Они характеризуются значительным отношением протяженности (L_1) поверхности к отклонению от правильной ее формы (h_1): $L_1/h_1 > 1000$.

Волнистость поверхности, т. е. наличие многих, многократно и закономерно повторяющихся, более или менее одинаковых по размерам отклонений, носящих характер волн, при отношении их шага L_2 к высоте h_2 наиболее часто в пределах $50 \geq L_2/h_2 \geq 1000$.

Причиной появления волнистости поверхности являются вибрации обрабатываемой детали, станка и инструмента, неравномерность протекания процесса резания вследствие различных причин (неравномерности подачи и пр.), а также другие факторы [1].

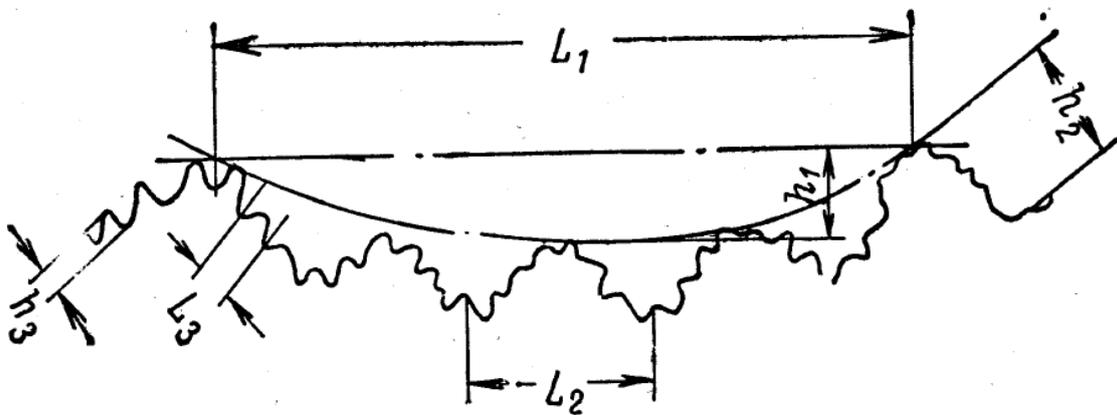


Рис. 1.5. Макро- и микрогеометрические отклонения

Микрогеометрические отклонения – это отклонения, или микронеровности, обуславливающие шероховатость, негладкость поверхности и характеризующиеся малым отношением их шага L_3 к высоте h_3 в пределах $L_3/h_3 < 50$.

Шероховатость поверхности – это совокупность неровностей с относительно малыми шагами, образующих рельеф поверхности. Шероховатость поверхности определяется по ее профилю, который представляет собой линию пересечения поверхности плоскостью, перпендикулярной направлению неровностей (рис. 1.6). Профиль рассматривается на длине базовой линии, в пределах которой оцениваются параметры шероховатости поверхности. В соответствии со стандартами на шероховатость по-

верхности при определении параметров ее профиля отсчет высот микронеровностей производится от средней линии.

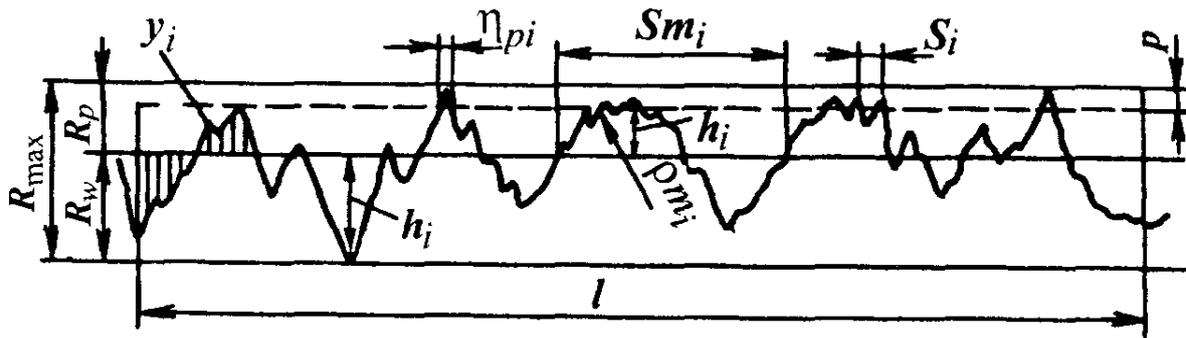


Рис. 1.6. Профилограмма шероховатости поверхности

Различают следующие параметры шероховатости:

Высотные:

R_a – среднее арифметическое отклонение профиля. Среднее арифметическое абсолютных значений (значений по модулю) отклонений профиля в пределах базовой длины:

$$R_a = \frac{1}{l} \cdot \int_0^l |y(x)| dx \quad \text{или} \quad R_a = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i|}{n}, \quad (1.4)$$

R_z – высота неровностей профиля по 10 точкам. Сумма средних арифметических абсолютных отклонений точек пяти наибольших минимумов и пяти наибольших максимумов профиля в пределах базовой длины:

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 |H_{i \max}| + \sum_{i=1}^5 |H_{i \min}|}{5}, \quad (1.5)$$

R_{\max} – наибольшая высота профиля. Расстояние между линией выступов профиля и линией впадин профиля в пределах базовой длины (рис. 1.6).

Шаговые:

S – средний шаг неровностей профиля по вершинам. Среднее арифметическое значение шага неровностей профиля по вершинам в пределах базовой длины:

$$S = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n S_i; \quad (1.6)$$

S_m – средний шаг неровностей профиля по средней линии. Среднее арифметическое значение шага неровностей профиля в пределах базовой длины:

$$S_m = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n S_{mi}. \quad (1.7)$$

Высотно-шаговые:

t_p – относительная опорная длина профиля. Отношение опорной длины профиля к базовой длине:

$$t_p = \frac{1}{l} \cdot \sum_{i=1}^n b_i. \quad (1.8)$$

Параметр t_p дает наиболее полное представление о форме неровностей, степени заполнения профиля металлом и его жесткости. По кривым изменения t_p по высоте уровня сечения профиля можно судить о форме неровностей и его жесткости. Таким образом, все указанные параметры оцениваются на опорной длине профиля.

Между параметрами R_a , R_z и R_{max} можно установить следующую корреляционную связь:

- точение и магнитно-абразивная обработка: $R_z = 5 \cdot R_a$;
- шлифование и суперфиниширование: $R_z = 5,5 \cdot R_a$;
- ППД, полирование и притирка (плосковершинная) $R_z = 4 \cdot R_a$ [1].

Перечисленный комплекс параметров шероховатости поверхности позволяет охарактеризовать высоту, шаг и форму микрорельефа. При одинаковых высотных параметрах микрорельеф может иметь разные форму и шаг (рис. 1.7) и различное влияние на эксплуатационные свойства детали.

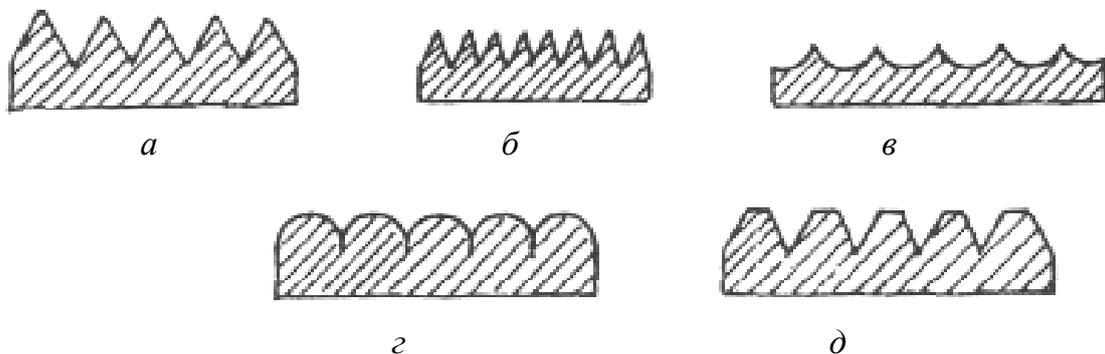


Рис. 1.7. Микропрофиль поверхности: а, б – среднежесткий; в – маложесткий; г, д – жесткий

Различают поперечную и продольную шероховатости (рис. 1.8). Первая характеризуется микронеровностями в направлении движения пода-

чи AC, вторая – в направлении главного движения АВ. На рис. 1.8 шаг волн обозначен L_2 , шаг поперечных микронеровностей – L_3 и шаг продольных микронеровностей – L'_3 .

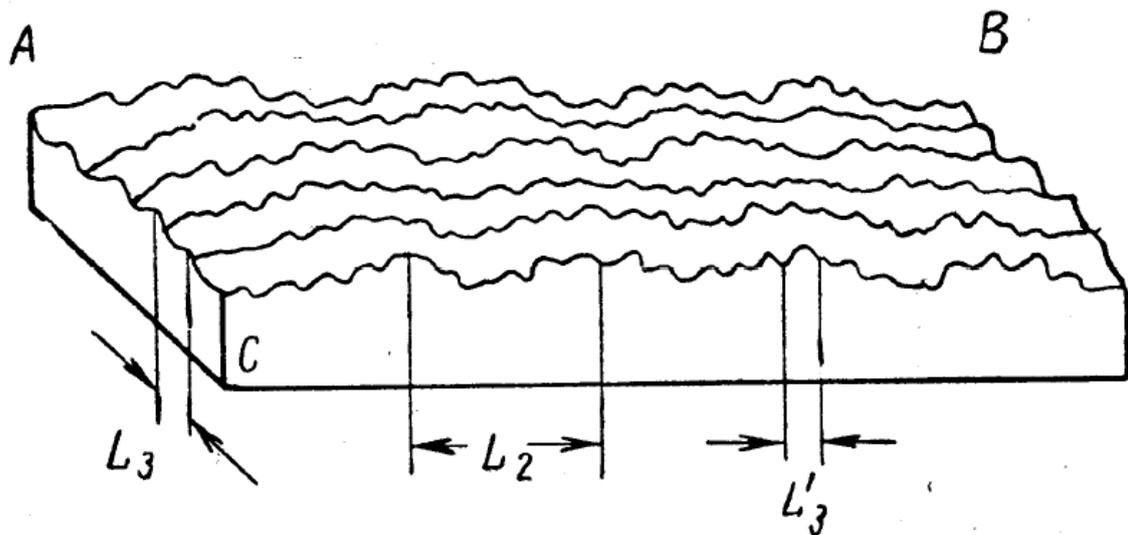


Рис. 1.8. Поперечная и продольная шероховатости

Характер и расположение микронеровностей по отношению к направлению подачи зависят, главным образом, от способа обработки. Так, при грубом точении и строгании наибольшая шероховатость наблюдается в направлении движения подачи, т. е. для этих способов обработки, как и для большинства других, характерна поперечная шероховатость. Оценку чистоты обработки поверхности детали производят в том направлении, в котором получают наибольшие значения высот микронеровностей, т. е. в направлении наибольшей шероховатости поверхности.

Волнистость поверхности в России не стандартизована, и для ее оценки используют параметры, аналогичные параметрам шероховатости, или параметры, установленные отраслевыми нормами либо зарубежными стандартами.

Волнистость поверхности оценивается:

- высотой волнистости W_z , мкм;
- максимальной высотой волнистости $W_{z \max}$, мкм;
- средним шагом волнистости S_{mw} и др.

Физическое состояние поверхностного слоя деталей в технологии механической обработки наиболее часто характеризуется параметрами структуры и фазового состава.

Структура – это характеристика металла, зависящая от методов изучения его строения. В связи с этим выделяют следующие типы структур: кристаллическая структура; субструктура; микроструктура; макроструктура.

Кристаллическая структура и субструктура могут быть определены методами прямого или косвенного анализа.

Микроструктура – это структура, определяемая с помощью металлографических микроскопов. С помощью этого анализа можно определить наличие, количество и форму структурных составляющих сплава.

Макроструктура – это структура, которая определяется не вооруженным глазом или при небольших увеличениях. С помощью макроанализа можно определить трещины, неметаллические включения, примеси и др.

Основные параметры структуры:

- размер зерен – l_z , мкм;
- форма и распределение зерен;
- ориентация решетки монокристаллического материала;
- текстура поликристаллического материала;
- плотность дислокаций – ρ_d , см³;
- концентрация вакансий – C_v ;
- размер (форма) блоков – l_b , нм;
- угол разориентировки блоков – α_b , град;
- размер областей когерентного рассеяния – $\langle D \rangle$, нм;
- среднее квадратическое смещение атомов, вызванное статическими искажениями решетки – $\langle u^2 \rangle$, нм²;
- среднее квадратическое смещение атомов, вызванное их тепловыми колебаниями $\langle u_t^2 \rangle$, нм².

Фазовый состав характеризуют числом и концентрацией фаз, распределением фаз по поверхностному слою, типом кристаллической структуры фаз, объемом сплава и др.

Основные параметры фазового состава:

- число, концентрация и распределение фаз;
- тип кристаллической структуры фаз – MS;
- параметры решетки фаз – a, b, c , нм; α, β, γ , град.

Химический состав характеризуется элементным составом сплава и фаз, концентрацией элементов в объеме фаз, сплава и др.

Параметры химического состава:

– концентрация (распределение) элементов в поверхностном слое – C_{χ} , %;

– концентрация элементов в фазах – C_{ϕ} , %.

Механическое состояние включает параметры:

– сопротивление металла деформированию: предел упругости, предел пропорциональности, предел текучести, предел прочности, твердость и др.;

– пластичность: относительное удлинение, относительное сужение, ударная вязкость и др., устанавливаемые специальными испытаниями образцов.

Приведенная классификация характеристик состояния ПС базируется, в основном, на классических параметрах микрогеометрии, физики и химии металлов. Она не содержит и не отражает в неявной форме ряд дефектов ПС, которые часто встречаются в производственных условиях и создают большие трудности при изготовлении деталей ответственного назначения.

Влияние качества поверхности

на эксплуатационные свойства деталей машин

Обеспечение заданного качества машин и длительное сохранение его во многом зависят от качества поверхностей и деталей. Основная причина (80 %) выхода из строя машин – это износ рабочих поверхностей сопряженных деталей [4]. Значительно реже наблюдаются поломки деталей из-за некачественного изготовления, их конструктивного несовершенства или заниженной усталостной прочности. В табл. 1.1 приведены взаимосвязи основных характеристик поверхностного слоя с эксплуатационными свойствами деталей машин [6].

Таблица 1.1

**Взаимосвязи основных характеристик поверхностного слоя
с эксплуатационными свойствами деталей машин**

Эксплуатационные свойства		Геометрические характеристики поверхности								Физико-механические свойства				
		Шероховатость						Волнистость		Погрешность формы	Наклеп		Остаточные напряжения	
		R _a	R _z	S _m	t _p	r	r'	W _a	S _w	H _{max}	HV	h _v	σ	h _σ
Износостойкость в условиях трения:	сухого граничного	+	+	+	++	++	-	+	+	+	++	++	++	++
		+++	+	+++	++	++	+	++	++	+	++	-	++	-
	жидкостного гидроабразивного	++	+	+++	++	+	+	++	++	+	-	-	-	-
		+	+	+	++	++	-	-	-	-	++	++	++	++
Усталостная прочность в условиях:	норм. темп. повыш. темп. агрес. среды	++	++	++	+	-	++	-	+	+	++	++	++	++
		++	++	++	+	-	++	-	+	+	+	+	-	-
		++	++	++	+	-	++	-	+	+	+	+	+	+
Коррозионная стойкость		++	++	++	++	-	+	++	+	-	++	++	++	++
Эрозионная стойкость		++	++	+	++	+	-	-	-	-	++	++	++	++
Кавитационная стойкость		++	++	+	++	+	-	-	-	-	++	++	++	++
Стойкость к коррозионному растрескиванию		++	++	++	+	+	++	-	-	-	++	++	++	++
Фреттинг-коррозия		++	++	+	++	+	-	+	+	+	+	+	+	+
Прочность сопряжений		+	+	+	+	++	-	+	+	+	+	+	-	-
Прочность сцепления покрытий		+	++	++	+	+	+	+	+	-	++	+	++	+
Контактная жесткость		+	+	+	++	++	-	+	+	+	++	-	+	-
Плотность соединений		++	+	+	++	-	-	++	+	+	++	+	-	-
Виброустойчивость		+	+	++	+	++	-	+	+	+	+	+	-	-
Обтекаемость газами и жидкостями		+	+	+	++	+	++	+	+	+	-	-	-	-
Отражательная способность		+	++	++	+	+	+	+	+	+	++	+	+	+
Эмиссия электронов		+	+	+	+	+	+	-	-	-	++	++	+++	

Уменьшение износа повышает долговечность машин, сохраняет заданную конструктором прочность и расходы на ремонт. Нередко расходы на ремонт за весь срок эксплуатации превышают себестоимость изготовления.

Трение и износ трущихся поверхностей. Влияние шероховатости поверхностей сопряженных деталей на износ проявляется в процессе приработки. Слой смазки, вводимый между трущимися поверхностями, может удерживаться лишь до тех пор, пока удельное давление не превысит определенного значения. При шероховатости трущихся поверхностей соприкосновение происходит в отдельных точках, соответствующих выступающим неровностям. В этих точках смазка выдавливается, и создаются условия для возникновения сухого трения.

Это очень существенно для подшипников скольжения современных быстроходных и точных машин. Улучшение условий смазки имеет большое значение. Однако снижение шероховатости поверхностей влияет на износ и в другом направлении (рис. 1.9).

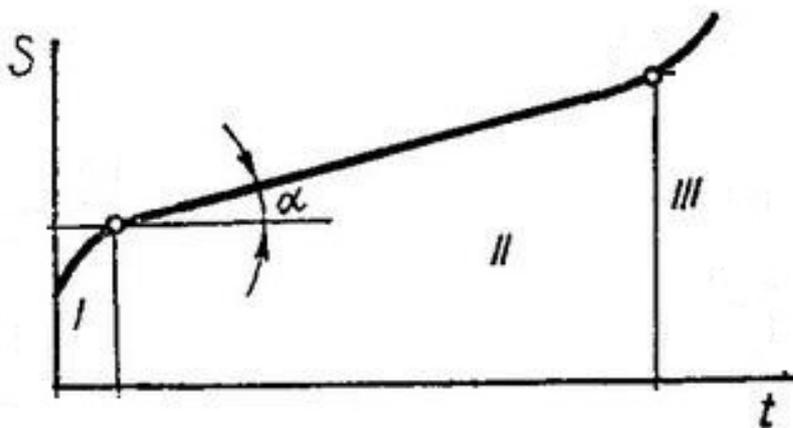


Рис. 1.9. Зависимость износа от продолжительности работы:
I — период приработки; II — срок службы детали после окончания приработки; III — период катастрофического износа

Вначале износ протекает быстро, причем с поверхностей удаляются наиболее выступающие неровности.

При трущихся поверхностях, обработанных обычными методами, величина начального износа очень велика. Зазоры быстро увеличиваются и к моменту окончания приработки возрастают почти до предельных максимальных значений.

Повышая качество поверхностей, можно резко увеличить долговечность машины. В течение последних десятилетий в технологии наблюдается непрерывное стремление повысить качество отделки поверхностей.

Качество неподвижных посадок. При измерении шероховатой поверхности само понятие «размер» становится неопределенным.

Значение диаметра соответствует измерению по вершинам неровностей.

При запрессовке вала в отверстие неровности на его поверхности и в отверстии сминаются, и действительный диаметр, определяющий усилие запрессовки, изменяется. Усилие запрессовки получится меньше.

Следовательно, шероховатость затрудняет расчет натягов. Кроме того, при повторных запрессовках и распрессовках соединение ослабевает.

Прочность деталей. Прочность деталей зависит от качества поверхности. При этом играют роль не только посадочные, но и свободные поверхности.

Разрушение детали обуславливается концентрацией напряжений вследствие наличия неровностей на поверхности. Чем меньше шероховатость, тем меньше возможность возникновения поверхностных усталостных трещин. Полировка поверхности обеспечивает значительное повышение предела усталости.

Исследования показали, что обработка поверхности давлением в холодном состоянии может в значительной степени повысить предел усталости. Это объясняется не только сглаживанием неровностей, но и созданием наклепа.

Сопротивление коррозии. Защитные покрытия, предохраняющие от коррозии, не могут быть использованы во всех случаях, например, на трущихся поверхностях. В таких случаях средством повышения антикоррозионной стойкости является улучшение качества поверхности.

Коррозия вызывается атмосферными явлениями, а также действием различных газов и жидкостей. Коррозионные вещества осаждаются в углублениях неровностей. Их действие распространяется вглубь. Выступающие части отпадают, и образуются новые выступы и впадины.

При высоком качестве поверхности рассматриваемый процесс протекает медленнее, чем при наличии глубоких впадин. Имеет значение про-

филь неровностей: чем больше радиус закрепления дна впадин, тем выше сопротивляемость коррозии.

Различные эксплуатационные требования и эстетические соображения. При назначении требуемой шероховатости поверхности необходимо считаться с другими условиями, которые в каждом конкретном случае могут оказаться доминирующими. К таким условиям относятся: теплопроводность и герметичность стыков, отражательная и поглотительная способность поверхностей, сопротивление протеканию газов и жидкостей в трубопроводах, сопротивление кавитационному разрушению в гидравлических машинах. Свободные поверхности машин часто отделяются тщательно для облегчения содержания в чистоте, так как при обтирке шероховатых поверхностей к ним пристают волокна обтирочных материалов [9].

Не последнее место занимают эстетические соображения. Точный и дорогостоящий механизм, прибор или инструмент должен иметь привлекательный внешний вид. Хорошая отделка всех его поверхностей невольно побуждает к более бережному с ним обращению.

Выбор параметров ПС деталей с учетом заданных условий эксплуатации и технологического обеспечения осуществляется в определенной последовательности.

1. Анализ технических условий на изделие и условий эксплуатации поверхности детали (нагрузки, температура, среда, ресурс работы).

2. Определение параметров основных эксплуатационных свойств ПС детали и их допустимых предельных изменений (прочность, износостойкость, коррозионная стойкость, эрозионная стойкость и др.).

3. Расчет и назначение параметров ПС, а также допустимых границ их изменения (шероховатость, волнистость, структура, фазовый и химический состав, физико-химические свойства и др.).

4. Выбор методов обработки рабочей поверхности детали и анализ физико-химических процессов, протекающих при обработке (силовые, тепловые, химические, светолучевые, магнитные).

5. Продолжительность физико-химического воздействия.

6. Расчет режимов и технологической себестоимости выбранных методов обработки.

7. Назначение метода, режима и других условий обработки.

На первом этапе конструктор устанавливает основные параметры эксплуатационных свойств и допустимые пределы их изменений для наиболее нагруженных поверхностей деталей, которые определяют ресурс и надежность работы машины. На основании результатов анализа взаимосвязи между параметрами эксплуатационных свойств, физико-химическими свойствами материала детали, а также характеристиками ПС детали назначаются параметры ПС и показатели точности детали, определяющие заданные эксплуатационные свойства и ресурс ее работы. При этом необходимо, чтобы деталь была технологичной, т. е. могла быть изготовлена на существующем машиностроительном производстве с минимальной себестоимостью. Поэтому уже на стадии разработки конструкции детали, назначения показателей точности и требований к состоянию ПС необходимо участие технолога или сам конструктор должен иметь достаточный уровень знаний в области технологии машиностроения. Имея данные о влиянии технологических и конструктивных факторов на качество изготовления детали, технолог разрабатывает технологический процесс, обеспечивающий заданные конструктором параметры точности и состояния ПС. В технологическом процессе должны быть указаны также методы контроля заданных конструктором параметров состояния ПС [6].

Вопросы для самопроверки

1. Из каких слоев состоит поверхностный слой детали?
2. Назовите геометрические параметры микронеровностей.
3. Какие параметры шероховатости вы знаете?
4. Назовите виды микропрофиля поверхности. Что такое поперечная и продольная шероховатость?
5. Чем характеризуется физическое состояние поверхностного слоя?
6. Как влияет качество поверхности на эксплуатационные свойства деталей машин?

2. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ В МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

ЛЕКЦИЯ 3. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

Технологические методы обеспечения качества поверхностного слоя; отжиг, виды отжига; закалка, способы закалки, закалка ТВЧ, плазменная поверхностная закалка, поверхностная закалка в электролите; электронно-лучевая обработка; отпуск закаленных сталей

Технологические методы обеспечения качества поверхностного слоя

В машиностроении разработано и используется большое количество различных методов воздействия на ПС деталей с целью обеспечения их конкретных эксплуатационных свойств (износостойкости, усталостной прочности, коррозионно-усталостной прочности, сопротивления фреттинг-коррозии и др.). По способам модификации ПС большинство существующих методов можно свести к трем группам.

- I. С нанесением материала.
- II. Без нанесения материала.
- III. Комбинированные методы.

Наиболее распространенными методами воздействия на поверхностный слой деталей являются следующие [6]:

- 1) упрочнение методами механической обработки;
- 2) упрочнение поверхностным пластическим деформированием (ППД);
- 3) термическая обработка объемная;
- 4) термическая обработка поверхностного слоя;
- 5) химико-термическая обработка;
- 6) лазерная обработка (ЛО);
- 7) электронно-лучевая обработка (ЭЛО);
- 8) ионно-лучевая обработка (ИЛО);
- 9) нанесение покрытий.

Для получения плотного и износостойкого поверхностного слоя металла используются следующие методы:

1. Термическая обработка в виде нагрева, закалки и отпуска. В зависимости от требуемой твердости и глубины слоя нагрев ведется в различных печах, пропусканием электрического тока, нагревом газового пламени, индукционным нагревом ТВЧ с последующей закалкой охлаждением: в жидкости, воздухом. Достигаемая твердость поверхности слоев до HRC 45...60.

2. Химико-термическая обработка. Цементация поверхностных слоев с помощью различных карбюризаторов с нагревом в печах, в газовых средах с последующей закалкой и отпуском. Азотирование, обеспечивающее получение чрезвычайно высокой твердости поверхностного слоя до HВ 1000 при минимальной деформации деталей, ведется при относительно низких температурах 500...550 °С.

Используется цианирование – насыщение углеродом и азотом.

3. Механическое упрочнение поверхностного слоя материалов деталей. К ним относятся:

Накатывание поверхностей деталей роликами, закрепленными в специальных державках. Ролики делают закаленными до HRC 60 с полированной поверхностью \varnothing 100...250 мм и шириной 10...12 мм. Давление на ролик берется 50–300 кг [9].

В результате накатывания поверхностный слой уплотняется и упрочняется, вследствие чего повышается долговечность деталей в 1,5...2 раза.

Выглаживание поверхностей отверстий шариками, роликами, прошивками создает на поверхности пластически уплотненный слой глубиной до 0,8...1 мм. При выглаживании оставляется небольшая величина (припуск) 0,02...0,2 мм.

Для упрочнения поверхностного слоя деталей используется также *дробеструйный наклеп*, осуществляемый сжатым воздухом или центробежными силами. Дробь диаметром 0,4...2 мм, глубина наклепа достигает 0,2...1 мм. Стальные дробинки выбрасываются со скоростью 70...90 м/с. Количество дроби, подаваемой в минуту, достигает 150 кг.

В результате в поверхностном слое создаются условия для более эффективного сопротивления усталости и пластической деформации. Снижаются напряжения их концентрации – в канавках, резких переходах от

одних сечений к другим. Для достижения требуемой шероховатости поверхностей деталей используют все виды механической, а также ряд процессов электрохимической обработки [9].

4. Хонингование. Для деталей машин, работающих в условиях трения, большое значение имеет маслосъемность обработанной поверхности. Увеличенную маслосъемность имеют поверхности, представляющие собой чередование плоских выступов и углублений для смазки. Такой профиль можно создать путем плосковершинного хонингования, которое осуществляется за несколько переходов. Сначала поверхность обрабатывается крупнозернистыми брусками на металлической связке, которые формируют поверхность с глубокими рисками, но малой опорной площадью ($t_p = 1...10\%$ на уровне $p = 1,5...2$ мкм). Затем проводится хонингование алмазными брусками меньшей зернистости на эластичной каучукодержательной связке. Происходит удаление выступов микронеровностей и формирование микроплощадок. Опорная поверхность увеличивается до $t_p = 50...60\%$. Эластичная связка позволяет снимать микрозаусенцы и скруглять края риски микропрофиля за счет того, что алмазные зерна находятся как бы в подпружиненном состоянии. Под действием сил микрорезания они погружаются в связку, а над впадинами микропрофиля выходят из нее.

Для предварительного хонингования чугуновых не термообработанных деталей рекомендуется использовать бруски из алмазов АСМ с 50...100 % концентрацией на связках М1 и МП1, для чугуновых закаленных деталей – на связках МС3 и МС15. Для окончательного плосковершинного хонингования во всех случаях рекомендуется применять бруски из алмазов АС2 или АС4 зернистостью 63/50 или 80/63 со 100%-ной концентрацией на связках Р11 и Р11Т.

При этом для брусков на металлической связке скорость вращательного движения $V = 35...40$ м/мин, скорость возвратно-поступательного движения $V = 12...15$ м/мин и давление $P = 0,7...0,8$ МПа. В случае использования брусков на эластичной связке $V = 25...30$ м/мин, $V = 8...10$ м/мин, $P = 0,5...0,6$ МПа. Плосковершинное хонингование бронзовых деталей осуществляется в начале крупнозернистыми брусками 160/125; 100/80, а затем мелкозернистыми брусками 40/28 или брусками на связке Р11, которые обеспечивают шероховатость $R = 0,2...0,4$ мкм [6].

Упрочнение термическими методами

Для получения структур, близких к равновесному состоянию, применяют **отжиг** – нагрев стали до заданной температуры, выдержку при ней и последующее медленное охлаждение. В процессе отжига улучшаются механические свойства и выравнивается химический состав стали, улучшается обрабатываемость ее на станках, уменьшаются остаточные деформации, осуществляется подготовка структуры стали для последующей термической обработки, изменяются свойства наклепанного металла. Различают следующие виды отжига: рекристаллизационный, полный, неполный, отжиг на зернистый перлит, изотермический, низкотемпературный, диффузионный [7].

Рекристаллизационный отжиг применяют для снятия наклепа холоднодеформированного металла. Нагрев при рекристаллизационном отжиге сталей марок У7, У8, У9, У10, У11, У12, У13, Х, 9ХС, ХВГ, 7ХЗ, ХВ4, 6ХВ2С осуществляют при температуре 670–700 °С; марок Х12, Х12М, Х12Ф1 – при 730–750°С; марок Р18, Р9 – при температуре 760–780 °С [7].

Полный отжиг применяют для уменьшения твердости, снятия напряжений и исправления структуры послековки в случае неправильного нагрева для охлаждения технологической оснастки, изготовленной из доэвтектоидной и эвтектоидных сталей. В результате полного отжига происходит полная перекристаллизация металла, структура получается мелкозернистая с равномерным распределением перлита и феррита.

Неполному отжигу подвергают доэвтектоидную сталь, прошедшую правильный режимковки. Режим охлаждения такой же, что и при полном отжиге.

Отжиг на зернистый перлит применяют для снижения твердости, улучшения обрабатываемости и подготовки структуры стали к последующей закалке.

Изотермический отжиг применяют для обработки легированных и высокоуглеродистых сталей. Назначение его такое же, что и назначение полного отжига. Для проведения изотермического отжига требуется меньше времени, чем для полного отжига. Для быстрого охлаждения изделие переносят в печь с меньшей температурой или охлаждают при открытой дверце с последующим выравниванием температуры.

Низкотемпературный отжиг применяют для снижения твердости и снятия внутренних напряжений в технологической оснастке из заэвтектоидных сталей. Изделие нагревают примерно до температуры 680 °С, выдерживают до полного прогрева, затем охлаждают вместе с печью или на отжиге. Процесс называют отжигом условно.

Диффузионный отжиг применяют для крупных литых кубиков из штампованных сталей. Цель процесса – устранение химической неоднородности и грубой структуры литых сталей.

Нормализация – процесс нагрева стали до температуры 775...970 °С, выдержка при этой температуре и последующее охлаждение на спокойном воздухе. Нормализацию применяют для снятия внутренних напряжений и улучшения обрабатываемости стали [7].

Закалка – операция, при которой сталь нагревают до температуры 770...1150 °С и, после выдержки при этой температуре, быстро охлаждают в воде, масле или на воздухе. В результате закалки получают неравномерные структуры, так как быстрое охлаждение препятствует фазовым превращениям. После закалки сталь становится твердой и хрупкой.

Различают следующие способы закалки: полную, неполную, с непрерывным охлаждением, изотермическую, ступенчатую, с подстуживанием, проводимую в двух жидких средах или с ограниченным пребыванием в охлаждающей среде, с самоотпуском, сквозную, несквозную, обычную, чистую, светлую, с обработкой холодом.

При *полной закалке* температура нагрева должна быть выше критических точек, а при *неполной закалке* – находиться в интервале закалочных температур. Если закалку проводят со скоростью охлаждения выше критической, то структура стали после охлаждения состоит из мартенсита и остаточного аустенита, а если проводят со скоростью охлаждения ниже критической, то из ферритокарбидной смеси различной степени дисперсности [7].

Закалку с непрерывным охлаждением проводят в воде, масле и других средах, причем температура среды должна быть ниже точки начала мартенситного превращения.

При *изотермической закалке* детали нагревают на 10...20 °С выше обычной температуры закалки, охлаждают в масле, в расплавленных со-

лях или щелочах, имеющих температуру выше мартенситной точки с выдержкой, достаточной для полного распада аустенита. В результате изотермической закалки уменьшаются напряжения и деформация, т. е. резко снижаются трещинообразование и коробление. Такую закалку применяют при изготовлении деталей сложной формы, больших размеров или большой длины.

При *ступенчатой закалке* охлаждение от высокой температуры ведут в горячей среде (ванне) при температуре выше мартенситной точки до выравнивания температуры по всему сечению. Дальнейшее охлаждение проходит на воздухе. При этом происходит превращение аустенита в мартенсит.

Закалка с подстуживанием состоит в том, что перед погружением в охлаждающую среду изделие выдерживают на воздухе. Время выдержки устанавливают опытным путем с таким расчетом, чтобы превращение аустенита не началось до погружения изделия в охлаждающую среду.

Во время *закалки в двух жидких средах* происходит быстрое охлаждение стали до температуры, которая выше мартенситной точки, и замедленное охлаждение – при температуре ниже этой точки. Такое состояние достигается при погружении изделия в воду и последующем переносе его в масло. Время охлаждения в воде устанавливают для каждого вида деталей опытным путем.

Закалку с ограниченным пребыванием в охлаждающей среде и дальнейшим охлаждением на воздухе проводят с таким расчетом, чтобы температура изделия при извлечении его из охлаждающей ванны была ниже мартенситной точки.

Закалку с самоотпуском применяют в основном для ударного инструмента, изготовленного из углеродистой стали, твердость которого должна уменьшаться от рабочей части к хвостовику. Закалку с самоотпуском проводят следующим образом: нагревают инструмент до температуры закалки, опускают рабочую часть в воду до потемнения, вынимают инструмент, быстро зачищают рабочую часть шлифовальной шкуркой или напильником. При появлении цвета побежалости, соответствующего заданной температуре отпуска, инструмент охлаждают в масле или воде.

При *сквозной закалке* изделие прокалывают насквозь. Оно имеет практически однородную структуру (мартенсит и остаточный аустенит)

и одинаковые свойства по сечению. При *несквозной закалке* сечение имеет неоднородную структуру (неравномерное распределение продуктов распада аустенита) и разные свойства.

Обычная закалка характеризуется наличием оксидов на поверхности.

Чистая закалка проводится при нагреве в печах с контролируемой атмосферой. При этом на поверхности изделий могут образовываться пригары масла или цвета побежалости.

Преимущество *светлой закалки* с охлаждением нагретой стали в расплавленных щелочах заключается в том, что деталь, прошедшая такой вид термообработки, имеет светлую поверхность, меньшее коробление и более высокую твердость. В результате такого метода термообработки можно повысить качество детали благодаря минимальной деформации, снизить трудоемкость процесса и сократить время на термообработку.

Закалку с последующей обработкой холодом применяют для более полного разложения аустенита. При этом закаленную деталь дополнительно охлаждают ниже 0 °С. Закалку с последующей обработкой холодом выполняют в такой последовательности: нагрев до температуры закалки, закалка, дополнительное охлаждение до температур ниже 0 °С, отпуск [7].

Закалка с нагревом токами высокой частоты (ТВЧ) или промышленной частоты (ТПЧ) применяется с целью повышения износостойкости и сопротивления усталости стальных деталей. Толщина модифицированного слоя может колебаться в широких пределах (0,2...10 мм), твердость его $HRC_{\text{Э}} = 40...70$, максимальные напряжения сжатия 300...800 МПа. Скорость нагрева поверхностного слоя ТВЧ или ТПЧ высокая, последующее охлаждение также осуществляется интенсивно, что позволяет в ряде случаев производить закалку на воздухе без применения специальных охлаждающих жидкостей.

Пламенная поверхностная закалка заключается в нагреве поверхности стальных деталей ацетилено-кислородным пламенем до температуры, превышающей на 50–60 °С верхнюю критическую точку A_{c3} , с последующим быстрым охлаждением водяным душем. Сущность процесса пламенной закалки состоит в том, что тепло, подводимое газовым пламенем от горелки к закаливаемой детали, концентрируется на ее поверхности и значительно превышает количество тепла, распространяемого в металл.

В результате такого температурного поля поверхность детали сначала быстро нагревается до температуры закалки, затем охлаждается, а сердцевина детали практически остается незакаленной и после охлаждения не изменяет свою структуру и твердость.

Пламенную закалку применяют для упрочнения и повышения износостойкости таких крупных и тяжелых стальных деталей, как коленчатые валы механических прессов, крупномодульные зубчатые колеса, зубья ковшей экскаваторов и т. п. Кроме стальных деталей, пламенной закалке подвергают детали, изготовленные из серого и перлитного чугуна, например направляющие станин металлорежущих станков.

Пламенная закалка разделяется на четыре вида:

1) последовательную, когда закалочная горелка с охлаждающей жидкостью перемещается вдоль поверхности обрабатываемой неподвижной детали;

2) закалку с вращением, при которой горелка с охлаждающей жидкостью остается неподвижной, а закаливаемая деталь вращается;

3) последовательную с вращением детали, когда деталь непрерывно вращается и вдоль нее перемещается закалочная горелка с охлаждающей жидкостью;

4) местную, при которой неподвижная деталь нагревается до заданной температуры закалки неподвижной горелкой, после чего охлаждается струей воды.

В зависимости от назначения детали глубина закаленного слоя обычно берется равной 2,5...4,5 мм. Основными факторами, влияющими на глубину закалки и структуру закаливаемой стали, являются скорость передвижения закалочной горелки относительно закаливаемой детали или детали относительно горелки; скорость выхода газов и температура пламени. Выбор закалочных машин зависит от формы деталей, способа закалки и заданного количества деталей. Если нужно закаливать разнообразные по форме и размерам детали и в небольших количествах, то целесообразнее применять универсальные закалочные машины. На заводах используют специальные установки и токарные станки. Для закалки применяют два вида горелок: модульные (с модулем от М10 и до М30) и многопламенные со сменными наконечниками, имеющими ширину

пламени от 25 до 85 мм. Конструктивно горелки устроены таким образом, что отверстия для газового пламени и охлаждающей воды расположены в один ряд, параллельно. В качестве горючих газов применяются ацетилен и кислород.

После пламенной закалки микроструктура в различных зонах детали различная. Закаленный слой получает высокую твердость и остается чистым, без следов окисления и обезуглероживания.

Переход структуры от поверхности детали к сердцевине происходит плавно, что имеет большое значение для повышения эксплуатационной стойкости деталей и полностью устраняет вредные явления – растрескивание и отслоение закаленных слоев металла.

Твердость изменяется в соответствии со структурой закаленного слоя. На поверхности детали она равна 56...57 HRC, а затем понижается до твердости, которую имела деталь до поверхностной закалки. Для обеспечения высокого качества закалки, получения равномерной твердости и повышенной прочности сердцевины литые и кованные детали перед пламенной закалкой подвергаются отжигу или нормализации в соответствии с обыкновенными режимами.

Поверхностная закалка в электролите заключается в том, что если постоянный электрический ток пропускать через электролит, то на катоде образуется тонкий слой, состоящий из мельчайших пузырьков водорода. Благодаря плохой электрической проводимости водорода сопротивление прохождению электрического тока сильно возрастает и катод (деталь) нагревается до высокой температуры, после чего закаливается. В качестве электролита обычно применяют водный 5–10-процентный раствор кальцинированной соды.

Процесс закалки несложен и заключается в следующем. Закаливаемую деталь опускают в электролит и присоединяют к отрицательному полюсу генератора постоянного тока напряжением 200...220 В и плотностью 3...4 А/см², в результате чего она становится катодом. В зависимости от того, какая часть детали подвергается поверхностной закалке, деталь погружают на определенную глубину. Деталь нагревается за несколько секунд, и ток выключают. Охлаждающей средой является тот же электролит.

Достоинства метода:

- возможность контроля режима закалки;
- возможность замены легированных сталей на углеродистые;
- равномерность нагрева детали;
- отсутствие прогрева изделия целиком, что приводит к экономии ресурсов;
- высокие прочностные свойства закаленных деталей;
- поверхность в процессе закалки не обезуглероживается и не окисляется;
- отсутствие закалочных трещин;
- отсутствие коробления;
- возможность подвергать закалке отдельные участки детали;
- экономия времени на проведение закалки;
- возможность внедрения установок в технологический процесс изготовления деталей.

Недостаток метода – высокая стоимость установок. Для минимизации недостатка установки рационально использовать при крупно- и многосерийном производстве деталей, что вполне оправдывает столь высокую цену.

Электронно-лучевая обработка позволяет получать в ПС толщиной 0,1...100 мкм на углеродистых и быстрорежущих сталях структурно-фазовое состояние, обеспечивающее высокую твердость и износостойкость. Основным узлом технологических установок для ЭЛО является электронная пушка (генератор электронов). Под действием электронного пучка происходит интенсивный нагрев ПС, который определяется параметрами электронного пучка, временем нагрева и теплофизическими свойствами материала детали. Положение зоны наиболее интенсивного тепловыделения может меняться по глубине ПС путем изменения параметров электронного пучка, тем самым можно изменять температуру по глубине ПС [6].

Отпуск закаленных сталей – процесс нагрева и выдержки закаленной стали при температуре на 20...30 °С ниже критической. Во время отпуска происходит превращение мартенсита и остаточного аустенита, в результате чего уменьшаются внутренние напряжения и хрупкость, повышаются вязкость и пластичность стали.

По условиям нагрева различают высокий, средний, низкий и многократный отпуск. При *высоком отпуске*, когда температура нагрева достаточно высока, сталь приобретает сорбитовую структуру. Для конструкционной стали температура сорбитизации равна 450...670 °С.

Средний отпуск применяют при необходимости сохранить упругие свойства в сочетании с достаточной вязкостью и проводят при температуре нагрева 350...480 °С.

При *низком отпуске* температура нагрева ограничена необходимостью сохранения высокой твердости. Высокохромистые, инструментальные и быстрорежущие стали нагревают до 400...600 °С.

При *многократном отпуске* процесс нагрева, выдержки и охлаждения повторяют несколько раз. Такой отпуск рекомендуется в основном для быстрорежущей стали.

Охлаждение после отпуска проводят на воздухе. Стали, содержащие хром и никель, после отпуска в интервале температур 150...200 °С охлаждаются в масле или воде, так как при более медленном охлаждении они становятся хрупкими [7].

Вопросы для самопроверки

1. Назовите технологические методы обеспечения качества поверхностного слоя.
2. Дайте определение отжига. Назовите виды отжига.
3. Что такое закалка? Какие способы закалки вы знаете?
4. Что такое закалка ТВЧ и плазменная поверхностная закалка?
5. В чем состоит сущность методов поверхностной закалки в электролите и электронно-лучевой обработки?
6. Что такое отпуск закаленных сталей? При каких температурах проводится высокий, средний и низкий отпуск?

ЛЕКЦИЯ 4. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Цементация, виды цементации; азотирование: достоинства и недостатки метода; нитроцементация: достоинства и недостатки метода; технология жидкостного цианирования; алитирование, способы алитирования

Под химико-термической обработкой (ХТО) понимается обработка путем химического и термического воздействия окружающей среды на ПС материала с целью получения качественно нового модифицированного физико-химического состояния ПС детали. В основе ХТО лежат диффузионные процессы, в результате которых формируется диффузионный слой определенного фазового и химического состава. Название того или иного процесса ХТО определяется названием насыщающих элементов (азотирование, цементация, цианирование, алитирование, борирование, карбонитрация и т. п.).

Цементация – процесс насыщения ПС металлов и сплавов углеродом в твердых, жидких и газовых средах. Наиболее эффективной считается газовая цементация. Для малоуглеродистых сталей (содержащих $< 0,2\%$ С) она проводится при температуре 920...950 °С. Оптимальное содержание углерода в модифицированном ПС толщиной 0,5...2 мм должно находиться в пределах 0,8...0,9 %. После цементации детали подвергаются закалке с нагревом до 850...900 °С и последующему низкому отпуску при температуре 180...200 °С. В результате образования мартенситной структуры цементованный ПС приобретает высокую твердость ($HRC_{\Sigma} 58...62$ при исходной $HRC_{\Sigma} 25...35$) и износостойкость при достаточно вязкой сердцевине детали. После цементации в ПС формируются остаточные напряжения сжатия 400...800 МПа [6].

За эффективную толщину цементированного слоя часто принимают сумму заэвтектоидной, эвтектоидной и половины переходной зон (до содержания 0,4 % С), что соответствует $HRC 50$. Для многих изделий эффективная толщина слоя принимается до $HV 500$ (5000 МПа) или 600 (6000 МПа) в зависимости от марки стали. После термической обработки твердость достигает $HRC 59...60$.

Достоинства метода:

- высокая твердость и износостойкость;

- высокий предел контактной выносливости;
- высокий предел выносливости при изгибе и кручении.

Цементация в твердом карбюризаторе – обработка, которой подвергаются стальные детали для повышения их твердости, теплостойкости и износостойкости, достигаемых при последующей закалке. Цементацию деталей малой и средней длины проводят в камерных печах; большой длины – в шахтных печах. Твердая цементация осуществляется посредством высокотемпературного вакуумного нагрева заготовок, находящихся в контейнере вместе с порошком углерода. Скорость диффузионных процессов при твердой цементации на несколько порядков ниже, чем при газовой и жидкой цементации. Твердая цементация может также осуществляться с использованием карбюризатора (вещества, содержащего углерод и активатор – углекислые соли Ва, Na, К). В этом случае заготовки и карбюризатор помещают в контейнер и нагревают в печи до 950 °С в вакууме или на воздухе, изолируя контейнер от внешней среды с помощью огнеупорной обмазки [6].

При ступенчатом режиме цементации процесс ведут в два этапа: после полного прогрева ящиков с деталями в печи устанавливают рабочую температуру 950 °С. После выдержки температуру в печи снижают до 850 °С и выдерживают ящики с деталями в течение определенного времени. При частичной цементации поверхности деталей, не подлежащие обработке, следует защищать с помощью асбеста, трубок, колпаков и обмазок [7].

Цементация в пасте применяется при единичном и мелкосерийном производстве и позволяет сократить продолжительность процесса. Цементацию проводят при температуре 910...950 °С. Продолжительность цементации при температуре 950 °С сокращается в 5...6 раз. Содержание углерода в цементованном слое достигает 1,0...1,2 %; твердость после закалки превышает 60 HRC. После цементации детали охлаждают на воздухе, затем осуществляют закалку.

Цементация в жидкой среде представляет собой процесс диффузионного насыщения ПС детали углеродом из жидкой среды, в качестве которой используют расплавы солей с добавкой карбида кремния (например, 75...85 % Na_2CO_3 ; 10...15 % NaCl ; 5...10 % SiC). Карбид кремния реагирует с содой, образуется свободный углерод, который диффундирует в материал.

Жидкая цементация проводится при температуре 815...850 °С и применяется в основном для получения слоев небольшой толщины (до 200 мкм) [6].

Газовая цементация осуществляется в муфельных шахтных электропечах. Для образования газообразной среды в качестве карбюризаторов используют жидкости – бензол, синтин, керосин, пиробензол, промышленное и трансформаторное масло или газы – природный и попутный, нефтяных месторождений, пропанобутановые смеси. Рабочая температура цементации составляет: при обычном режиме 900...940 °С; при высокотемпературном 970...1100 °С. Охлаждение деталей после газовой цементации осуществляют в колодцах, на воздухе или в закалочных средах. Скорость охлаждения выбирают такой, чтобы обеспечивались минимальное коробление, отсутствие трещин и карбидной сетки, имелась возможность механической обработки. Температура процесса составляет 900...1000 °С; скорость цементации 0,12...0,95 мм/ч; достигаемая глубина цементации 0,5...2,5 мм [6].

Азотирование – это процесс насыщения ПС металлов и сплавов азотом посредством диффузии из внешней среды. Азотированию чаще всего подвергаются детали из конструкционных сталей, содержащих нитридообразующие элементы (Cr, Al, Mo, Ti, W, V, Nb, Mn), а также детали из легированных сталей. Азотирование стальных деталей чаще всего производят в муфельных печах в потоке аммиака с добавлением молекулярного азота при 500...700 °С. В течение 20...80 ч обеспечивается глубина модифицированного слоя 0,1...0,5 мм, его твердость $HV = 6,5...11$ ГПа, содержание азота 10...12 %, максимальные остаточные напряжения сжатия 400...800 МПа. После азотирования проводят замедленное охлаждение вместе с печью до температуры 300...350 °С при сохранении подачи аммиака. Твердость после азотирования достигает 450...1000 HV при глубине слоя 0,15...0,55 мм. Если азотированию подвергают не всю поверхность, то элементы, не подлежащие азотированию, покрывают слоем олова или меди толщиной 0,01...0,15 мм [7].

Азотирование применяют для упрочнения, повышения износостойкости, сопротивления усталости и коррозионной стойкости деталей, работающих в агрессивных средах. Так, азотирование деталей из коррозионно-стойких сплавов, работающих при температурах около 500 °С во влажной

среде, существенно повышает их износостойкость за счет снижения коэффициента трения с 0,7 до 0,1. Кроме традиционного азотирования углеродистых, легированных сталей и чугунов, все более широкое применение получает высокотемпературное азотирование тугоплавких металлов и сплавов на их основе (хром, молибден, вольфрам, ниобий, титан). При этом используется нагрев ТВЧ и азотирование в плазме тлеющего разряда, что в десятки раз сокращает продолжительность процесса [6].

Азотированный слой имеет следующую структуру (рис. 2.1):

α -фаза – азотистый феррит, имеет ортогональную решетку;

γ -фаза – азотистый аустенит, имеет гексагональную решетку, максимальная растворимость азота 2,8 %;

ε -фаза – твердый раствор на базе нитрида FeN, имеет гексагональную решетку;

ξ -фаза – FeN, имеет ромбическую решетку с упорядоченно расположенными атомами азота. Данная фаза устойчива в атмосфере аммиака до 450 °С [13].

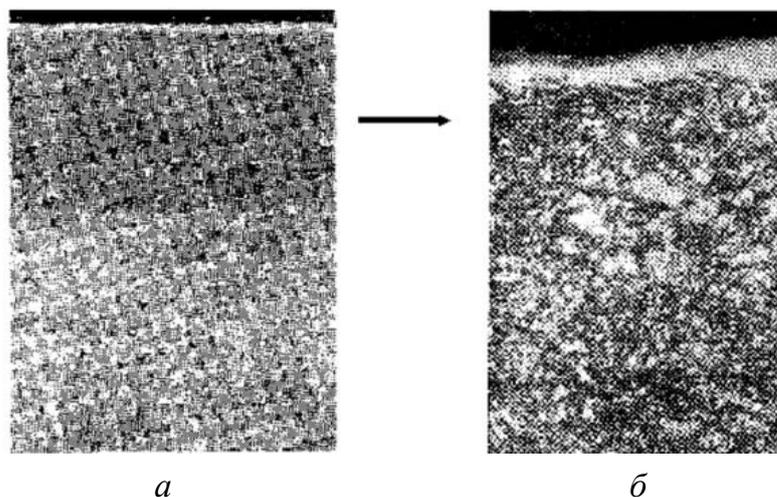


Рис. 2.1. Структура азотированного слоя с нитридной корочкой:
 a – $\times 100$ и b – $\times 250$

Характеристики материала

При повышении твердости и износостойкости при температуре 500...560 °С в течение 24...90 ч скорость азотирования составляет 0,01 мм/ч. Содержание азота в поверхностном слое составляет 10...12 %, толщина слоя $h = 0,3...0,6$ мм. На поверхности получают твердость около 1000 HV. Охлаждение проводят вместе с печью в потоке аммиака.

Достоинства метода:

- высокая твердость, неизменяющаяся при нагреве до 400...450 °С;
- высокая износостойкость и низкая склонность к задирам;
- высокий предел выносливости;
- хорошая сопротивляемость к коррозии;
- хорошая обрабатываемость шлифованием азотированного слоя.

Недостатки метода:

- большая длительность процесса (цикл азотирования длится до двух суток);
- необходимость применения дорогих легированных сталей, вследствие чего азотированные детали получаются в 2...3 раза дороже, чем обычные;
- небольшая толщина слоя (уменьшение твердости доходит в среднем до 300 при углублении от 0 до 0,1 мм);
- возникновение деформации деталей, являющейся следствием внутренних напряжений, получающихся при азотировании [5].

Цианирование – это процесс одновременного насыщения ПС стальных деталей азотом и углеродом. Оно бывает жидкостное и газовое, которое называют нитроцементацией.

Нитроцементация осуществляется в контейнерах с карбюризатором, содержащим цианистые и углекислые соли (например, 30...40 % $K_4Fe(CN)_6$, 10 % Na_2CO_3 , древесный уголь). Обработку заготовок осуществляют в среде науглероживающих и азотирующих газов (например, аммиак 2...6 % с пропаном или светильным газом).

Наиболее часто нитроцементация проводится при температуре 850...870 °С. После нитроцементации следует закалка в масло или непосредственно из нитроцементационной печи с температуры насыщения или небольшого подстуживания.

При использовании шахтных печей чаще нитроцементацию выполняют в атмосфере, полученной от расщепления жидких углеводородов с добавками аммиака или в необработанном природном (городском) газе с добавками аммиака, а также в агрегатах, оборудованных камерными или безмуфельными проходными печами в атмосфере эндогаза с добавками метана и аммиака.

Достоинства метода:

- позволяет производить обработку деталей сложной конфигурации, склонных к короблению;
- процесс происходит при более низкой (840...860 °С), чем при цементации температуре;
- в присутствии азота резко возрастает диффузионная подвижность углерода;
- низкая деформация и коробление обрабатываемых деталей;
- повышение стойкости печного оборудования;
- уменьшение времени на подстуживание перед закалкой;
- повышается сопротивление износу и коррозии.

Недостатки метода:

- необходимость строгого поддержания в нужных пределах науглероживающей и азотирующей способности газовой среды;
- глубина слоя при нитроцементации практически ограничивается в пределах 0,7...0,8 мм;
- с повышением содержания азота в поверхностном слое появляется дефект в виде темных пятен (пор);
- дефектом нитроцементованного слоя является также и обезуглероживание, которое снижает предел выносливости на 20...25 % [5].

Преимущества газовой нитроцементации по сравнению с газовой цементацией:

- 1) увеличение производительности на 20...30 %;
- 2) отсутствие отложений сажи на деталях (наличие сажи приводит к неравномерной твердости после закалки);
- 3) возможность получения более стойкого против износа слоя;
- 4) увеличение глубины прокаливания нитроцементированного слоя по сравнению с цементированным вследствие насыщения его азотом.

Преимущества газовой нитроцементации по сравнению с цианированием в расплавленных цианистых солях:

- 1) безвредность процесса для обслуживающего персонала;
- 2) возможность регулирования насыщения слоя азотом и углеродом путем изменения скорости подачи аммиака и масла;

3) газовая нитроцементация дешевле цианирования в расплавленных цианистых солях, так как стоимость этих сильно ядовитых солей в несколько раз больше стоимости аммиака и пиробензола.

Жидкостному цианированию подвергаются детали машин после окончательной обработки резанием. При цианировании происходит одновременное насыщение поверхностного слоя азотом и углеродом. Различают три способа цианирования: низкотемпературное (при 540...580 °С), среднетемпературное (при 820...860 °С) и высокотемпературное (при 920...960 °С). При высокотемпературном цианировании процесс больше приближается к цементации, а при низкотемпературном – к азотированию.

Низкотемпературному цианированию подвергают режущий инструмент из быстрорежущих сталей (сверла, зенкеры, метчики, фрезы), а также углеродистые стали. После низкотемпературного цианирования углеродистых сталей (570 °С, 0,5...3 ч) на поверхности образуется карбонитридный слой (Fe_3CN) толщиной $a = 10...15$ мкм. Он менее хрупкий, чем карбиды (Fe_3C) и нитриды (Fe_3N). Между этим слоем и основным металлом образуется подслой азотистого твердого феррита ($HV = 6,0...10,0$ ГПа на легированных сталях) толщиной $a = 200...500$ мкм. Цианирование на небольшую глубину (0,15...0,5 мм) осуществляют при нагреве изделия в среде цианирования до температуры 840...870 °С в течение 0,5...2 ч с последующей закалкой (непосредственно и ванны цианирования). Для увеличения глубины цианирования процесс проводят при температуре 900...950 °С в течение 2...6 ч. С целью повышения твердости, теплостойкости и противозадирных свойств изделия осуществляют низкотемпературное цианирование при 560...580 °С.

Высокотемпературное цианирование применяют для обработки средне- и низкоуглеродистых сталей (простых и легированных). Толщина модифицированного слоя зависит от состава расплава, температуры и продолжительности процесса. Средняя скорость высокотемпературной нитроцементации составляет 80...100 мкм/ч. Для конструкционных сталей $a = 15...500$ мкм, $HRC_{\Sigma} 58$; для быстрорежущих сталей $a = 10...60$ мкм, $HRC_{\Sigma} 60...72$. Цианированный слой по сравнению с цементированным обладает большей твердостью, сопротивлением износу и коррозионной стойкостью. В ряде случаев повышается также сопротивление усталости.

После цианирования заготовки подвергают закалке в масле или воде и низкому отпуску (150...170 °С, 3 ч) [6]. Цианирование проводят в соляных (с наружным электрообогревом) или электродных печах-ваннах.

Алитирование – это процесс насыщения материала ПС алюминием посредством его диффузии из внешней среды. Применяют следующие способы алитирования: 1) насыщение из расплавов солей; 2) электрофоретическое нанесение насыщенных составов; 3) насыщение из паровой фазы в вакууме; 4) насыщение из газовой фазы. Процесс насыщения из расплавов солей реализуется в виде двух способов: 1) химическим осаждением из растворов; 2) электрохимическим путем. При химическом способе процесс насыщения происходит в металлической ванне с насыщающим расплавом, содержащим Al. В течение 2...6 ч при температуре 570...630 °С достигается толщина модифицированного слоя 30...40 мкм.

При электрохимическом варианте насыщения в графитовый тигель загружается электролит системы $\text{BaCl}_2\text{--AlF}_3\text{--NaF}$ и алюмомедный сплав. Тигель является анодом. Заготовка является катодом, она погружается в расплав солей при температуре 750...850 °С и выдерживается в нем 10...50 мин (плотность тока измеряется в ампер на квадратный сантиметр (A/cm^2)). Толщина покрытия 0,10...3 мм. После получения покрытия заготовку подвергают диффузионному отжигу при 1040...1100 °С. Насыщение из паровой фазы проводится при высоких температурах (более 1000 °С) в вакууме. В течение 1...4 ч формируется диффузионный слой толщиной 10...100 мкм.

Наибольшее распространение в промышленности находит насыщение ПС алюминием из газовой фазы. В качестве сырья используют порошковые смеси Al+Fe, Al+Cl, Al+Si, Al_2O_3 (инертный наполнитель) и активатор NH_4Cl . Обработка ведется в контейнере при температуре 500...1200 °С в течение 2...6 ч.

Для повышения износо-, жаростойкости, сопротивления коррозии и эрозии применяют следующие методы диффузионного насыщения ПС: 1) борирование сталей и сплавов ($a = 1\text{...}350$ мкм; HV 2250...3250 МПа); 2) силицирование сталей и сплавов ($a = 50\text{...}200$ мкм; HV 1000...1250 МПа); 3) хромирование сталей, чугунов, тугоплавких металлов и сплавов ($a = 20\text{...}200$ мкм, HV 1000...2000 МПа); 4) титанирование сталей и сплавов ($a = 50\text{...}300$ мкм, HV 2500...4000 МПа) [6].

Вопросы для самопроверки

1. Дайте определение цементации. Назовите виды цементации.
2. Что такое азотирование? Назовите достоинства и недостатки метода.
3. Что такое нитроцементация? Назовите достоинства и недостатки метода.
4. В чем состоит суть метода жидкостного цианирования?
6. Что такое алитирование? Назовите способы алитирования.

ЛЕКЦИЯ 5. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА УПРОЧНЯЮЩЕГО НАКАТЫВАНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Статические и динамические методы поверхностно-пластического деформирования (ППД), сущность процесса и схемы обработки упрочняющего накатывания, границы применения методов накатывания, преимущества метода упрочняющего накатывания, метод врезания и метод подачи при упрочняющем накатывании, комбинированный метод 10-X

Методы ППД подразделяют на статические и динамические. При статических методах инструмент, рабочее тело или среда воздействуют на обрабатываемую поверхность с постоянной силой, а очаг деформации плавно перемещается по всей обрабатываемой поверхности. Инерционные силы не оказывают существенного влияния на статические процессы ППД.

К статическим методам относятся различные виды выглаживания, обкатывания и раскатывания, а также однократного обжатия (без перемещения очага деформации). При динамических методах инструмент, рабочее тело или среда многократно воздействуют на обрабатываемую поверхность с изменением силы от нуля до максимума.

Решая вопрос о возможности и целесообразности применения ППД для упрочнения конкретных деталей, необходимо учитывать ряд его особенностей. Не все металлы и сплавы можно подвергать ППД. Металл должен быть способен пластически деформироваться при комнатной температуре. Металлы с относительным удлинением менее 6 %, как правило, трудно обрабатываются или совсем не обрабатываются ППД. Исключение составляют серые и легированные чугуны, которые при определенных условиях можно

упрочнять методами ППД. Некоторые материалы нельзя обрабатывать ППД из-за образования большой шероховатости поверхности (алюминиевые сплавы, медь и др.). При упрочнении ППД труднообрабатываемых материалов высокой твердости ($HRC_{\Sigma} > 45$) возникает большой износ металлического инструмента. Такие материалы целесообразно обрабатывать алмазным или твердосплавным отделочно-упрочняющим инструментом.

На операциях упрочнения ППД повышенные требования предъявляются ко всей технологической системе. Она должна обладать большей жесткостью и виброустойчивостью, чем технологические системы для обработки резанием. После обработки ППД обеспечивается точность 6...8 квалитетов для валов и 5...7 квалитетов для отверстий. Она не улучшается по сравнению с предшествующей операцией, а может даже ухудшаться. Поэтому требуемая точность детали должна быть обеспечена на операциях, предшествующих обработке ППД. Поверхность перед ППД не должна иметь задиров, царапин и других дефектов, которые методами ППД не устраняются [6].

Общим достоинством всех методов ППД являются образование мелкозернистой структуры и отсутствие термических дефектов. Можно уменьшить шероховатость поверхности в несколько раз за один рабочий проход и достигнуть $R_a = 0,1...0,05$ мкм, получить регулярные микрорельефы с заданной площадью углублений для задержания смазочного материала, повысить микротвердость и сформировать сжимающие остаточные напряжения [12].

Ответственным этапом разработки технологического процесса ППД является выбор рациональных методов и режимов обработки, которые были бы производительными и обеспечивали требуемое качество деталей по состоянию ПС и точности. Нерациональные режимы ППД могут вызвать перенаклеп металла ПС и его «шелушение». Для назначения режимов ППД вначале делают предварительные расчеты, сравнивают их с имеющимися данными по обработке ППД близких деталей (прототипов), после чего апробируют и уточняют в производственных условиях. Особое внимание необходимо уделять разработке технологических процессов ППД маложестких ответственных деталей (турбинных и компрес-

сорных лопаток, длинных валов, штоков и др.), технологические остаточные деформации которых при ППД (коробление) могут быть значительно больше допустимых и привести к браку [6].

Упрочняющее обкатывание и раскатывание

Сущность процесса и схемы обработки. Обкатывание и раскатывание осуществляют роликами и шариками, оказывающими давление на поверхность обрабатываемой детали. При определенном (рабочем) усилии в зоне контакта деформирующих элементов и детали интенсивность напряжений превышает предел текучести, в результате чего происходит пластическая деформация микронеровностей, изменяются физико-механические свойства и структура поверхностного слоя (например, увеличивается микротвердость или возникают остаточные напряжения в поверхностном слое). Объемная деформация детали обычно незначительна [11]. На рис. 2.2 приведены схемы процесса обкатывания.

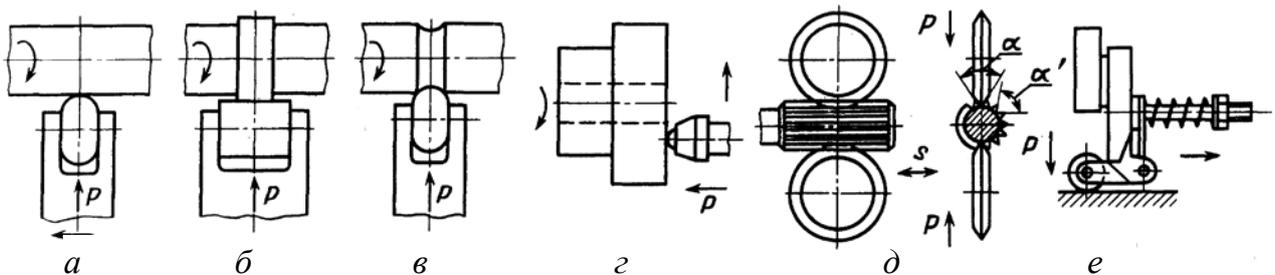


Рис. 2.2. Схемы процесса обкатывания:

- a* – роликом с продольной подачей; *б* – роликом с поперечной подачей;
- в* – фасонным роликом с поперечной подачей; *г* – торцовой поверхности шариком;
- д* – роликами поверхности шлицев ($\alpha > \alpha'$);
- е* – плоской поверхности роликом

На рис. 2.3 показано действие процесса накатывания в месте контакта инструмента и детали. Один или несколько роликов воздействуют на поверхность заготовки под прямым углом с усилием накатывания. В результате в вершинах профиля образуются сжимающие напряжения, которые пластически деформируют поверхностный слой детали [3].

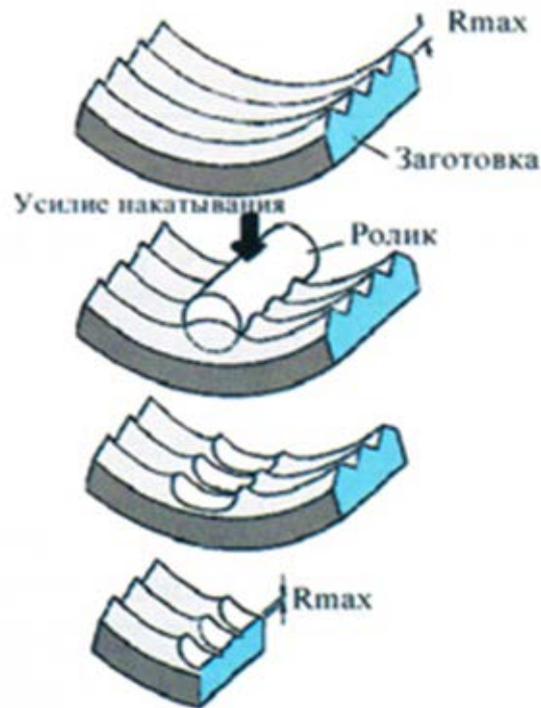


Рис. 2.3. Процесс накатывания

Материал из вершин профиля перемещается в радиальном направлении наружу в зоны низких сжимающих напряжений и заполняет впадины снизу, как показано на рис. 2.4.

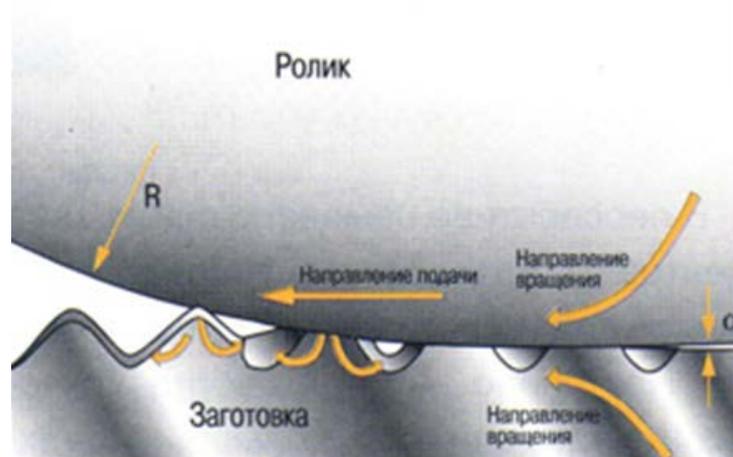


Рис. 2.4. Принцип метода накатывания

На верхней части рис. 2.5 показана типичная топография поверхности, полученной токарной обработкой с подачей 0,25 мм на оборот резцом с радиусом при вершине 0,4 мм. Шероховатость поверхности равна Rz20 и является оптимальной для накатного полирования [3].

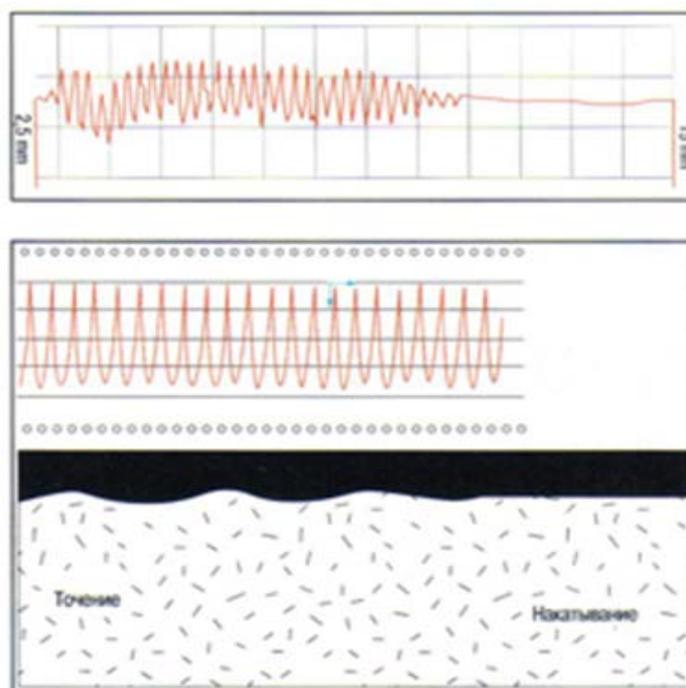


Рис. 2.5. Накатное полирование после точения

На нижней части рис. 2.5 представлена поверхность, обработанная предварительно точением и окончательно накатным полированием (справа на рисунке). По сравнению с исходным профилем заметно, что вершины имеют плоскую форму. Широко распространено ошибочное мнение, что при накатном полировании вершины деформируются, загибаясь во впадины. Это означало бы, что существует верхний слой материала, не имеющий металлической связи с остальным материалом. Показанное на рис. 2.5 протекание процесса формирования поверхности как раз опровергает это мнение.

При использовании обычных инструментов (в которых усилие на роликах создается механическим способом) граница применения данного метода находится на уровне 42...45 HRC. Материал более высокой твердости может быть обработан гидростатическим «шариковым» инструментом.

Другой предпосылкой является хрупкость (деформируемость) материала. Для количественной оценки служит относительное удлинение при разрыве A_4 . Здесь не существует абсолютной границы. Эта граница зависит от степени деформации, т. е. от соотношения исходной шероховатости и желаемой конечной шероховатости. Результаты практических исследований приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Границы применения метода накатного полирования

Критерий	Граничное значение	Описание	Степень деформации
Твердость	Меньше 42...45 HRC	Механические инструменты с одним или несколькими роликами	20:1
	Больше 42 HRC Меньше 65 HRC	Гидростатические инструменты	10:1...12:1 (зависит от твердости)
Относительное удлинение A_4	A_4 больше или равно 8 %	Накатное полирование возможно без ограничений	20:1
	$5 \% \leq A_4 \leq 8 \%$	Требуются предварительные испытания	10:1
	$A_4 \leq 5 \%$	Получаемая шероховатость не меньше R_z2	5:1
Исключение: чугуны		Достижимая шероховатость $R_z3...R_z4$	5:1

До сегодняшнего дня не существует неразрушающего метода контроля качества поверхности, обработанной упрочняющим накатыванием. Поэтому большое значение имеет неизменное постоянное соблюдение параметров обработки, особенно усилия накатывания (табл. 2.2).

Таблица 2.2

Границы применения методов накатывания

Критерий	Накатное полирование	Упрочняющее накатывание
Цель метода	Получение заданной шероховатости	Повышение усталостной прочности
Проверка качества	Неразрушающие методы контроля шероховатости	Только разрушающие методы контроля образцов: тесты на долговечность; измерение внутренних сжимающих напряжений
Коррекция обработки	Возможна повторная обработка накатным полированием	На данном образце невозможна, так как производится разрушающий контроль
Требования к инструменту	Настройка на размер по диаметру и настройка положения роликов	Контроль параметров процесса: усилие накатывания; подача; скорость; геометрия

Большая доля возникающих в процессе накатывания сжимающих напряжений между роликом и деталью остается после окончания процесса

накатывания. Для повышения усталостной прочности особенно важны сжимающие напряжения в осевом направлении (в меньшей степени в тангенциальном). Развитие этих напряжений представлено на рис. 2.6.

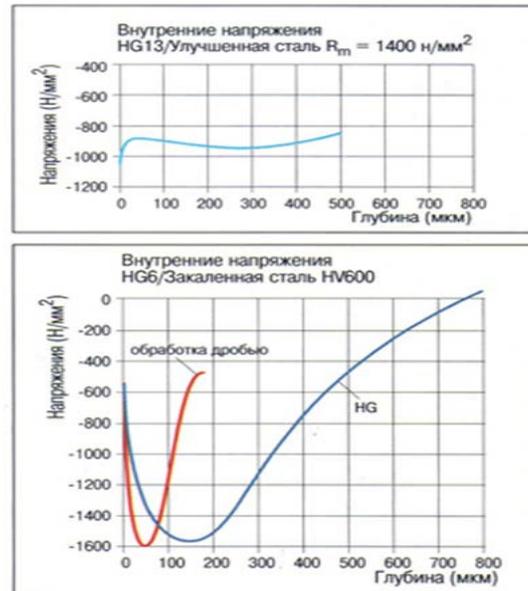


Рис. 2.6. Внутренние напряжения при различных методах

Упрочняющее накатывание обладает определенными преимуществами перед другими процессами упрочнения. Особые преимущества существуют по сравнению с дробеструйной обработкой (рис. 2.6, табл. 2.3).

Таблица 2.3

Преимущества упрочняющего накатывания перед дробеструйной обработкой

Упрочняющее накатывание (применяется при обработке поверхности геометрически определенной формы)	Обработка дробью (применяется при геометрически нерегулярной поверхности)
Большая глубина проникновения	Размер стальной дроби сравнительно мелкий
Сжимающие напряжения зависят от силы F	Переработка и утилизация дроби
Усилие F обеспечивается гидравликой или усилием пружины	Высокая шероховатость поверхности
Простота в обслуживании	В общей сложности на процесс влияют 12 параметров
Малое цикловое время	Сложность повторения процесса
Обработка за тот же постанов, что и обработка резанием	Требуется специальная установка
Легко доступны отверстия и углубления	Процесс отлаживается только специалистом

Упрочняющее накатывание (применяется при обработке поверхности геометрически определенной формы)	Обработка дробью (применяется при геометрически нерегулярной поверхности)
Доступна на любом станке для обработки резанием	Большая продолжительность процесса
	Расходы на транспортировку
	Увеличение продолжительности всего процесса
	Трудность при обработке углублений

Важным является то, что при накатывании параметры процесса можно контролировать, а значит, и воспроизводить. Соответственно повышается надежность процесса в целом.

Перемещения в процессе обработки

Канавочный способ (метод врезания). Этот способ применяется в основном при упрочняющем накатывании. Используются один или три профильных ролика, радиус которых полностью соответствует радиусу галтели. Ролики устанавливаются под углом, как показано на рис. 2.7, таким образом, чтобы результирующее усилие накатывания было направлено в зону, где ожидается наибольшая усталость материала. Обычно это область наибольших концентраций напряжения при рабочей нагрузке [3].

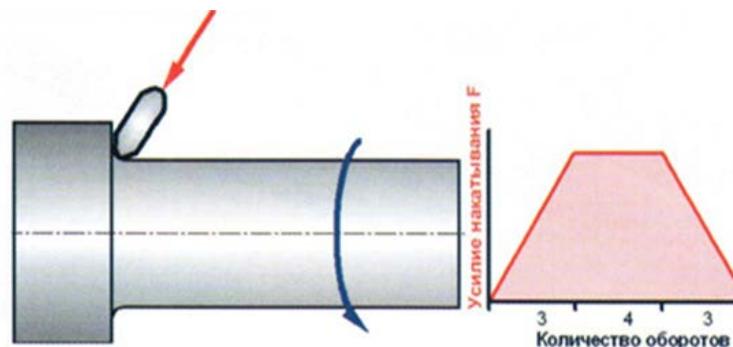


Рис. 2.7. Канавочный метод врезания

Ролики имеют возможность самоустанавливаться по отношению к обрабатываемому месту. В результате выравниваются припуски на обработку и одновременно автоматически обеспечивается желаемое распределение сжимающих напряжений. Это очень важно для надежности процесса. Процесс осуществляется за несколько оборотов заготовки (напри-

мер, 10). Как видно на диаграмме (рис. 2.7), усилие накатывания медленно нарастает за три оборота, удерживается на протяжении четырех оборотов и затем уменьшается до нуля за три оборота. Благодаря такому плавному входу и выходу гарантированно исключаются скачки сжимающих напряжений. Эти скачки могут привести к дополнительным концентраторам напряжения. Для реализации этого способа необходимо два движения:

- вращение (инструмента или заготовки в зависимости от станка и формы детали);
- врезание (в осевом направлении для инструмента с несколькими роликами и в направлении усилия F для инструмента с одним роликом).

Этот способ имеет узкое применение, например, для галтелей с радиусом меньше 4 мм. Поскольку радиус роликов должен быть равен обрабатываемому радиусу, требуется комплект роликов для каждого случая. Обработка может проводиться как на валах, так и на ступенях отверстий или в глухих отверстиях. Особым случаем применения этого способа является упрочняющее накатывание резьбы. Но в этом случае инструмент совершает движение подачи в соответствии с шагом резьбы, профильные ролики находятся в постоянном контакте с профилем резьбы, и это соответствует канавочному методу.

Метод подачи. Этот метод применяется для обработки больших поверхностей. Уже рассмотренные при канавочном методе движения (вращения и врезания) дополняются одновременным движением подачи (рис. 2.8).

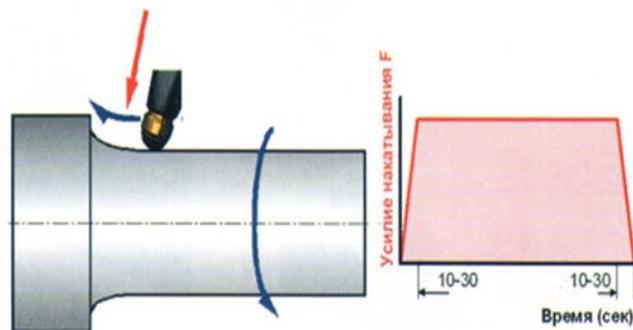


Рис. 2.8. Метод подачи

В данном случае могут применяться как механические, так и гидростатические, как показано на рис. 2.8, инструменты. Для исключения скачков напряжения в этом методе усилие также нарастает и снимается плавно. На рисунке приведено типичное время нарастания (снятия) – 10–30 сек.

Применение метода накатывания в сочетании с точением с большой подачей существенно увеличивает экономию. Широкий спектр применения такого комбинированного метода нашел отражение и в его названии – «Метод 10-Х» (рис. 2.9) [3]. Потенциал возможного снижения затрат показывает диаграмма слева (рис. 2.9). Было проведено сравнение времени обработки детали диаметром 80 мм и длиной 160 мм:

- при тонком точении со скоростью резания 300 м/мин и подачей 0,08 мм/об;
- обработке методом 10-Х точением со скоростью 250 м/мин и подачей 0,25 мм/об и накатным полированием со скоростью 150 м/мин и подачей 0,8 мм/об.

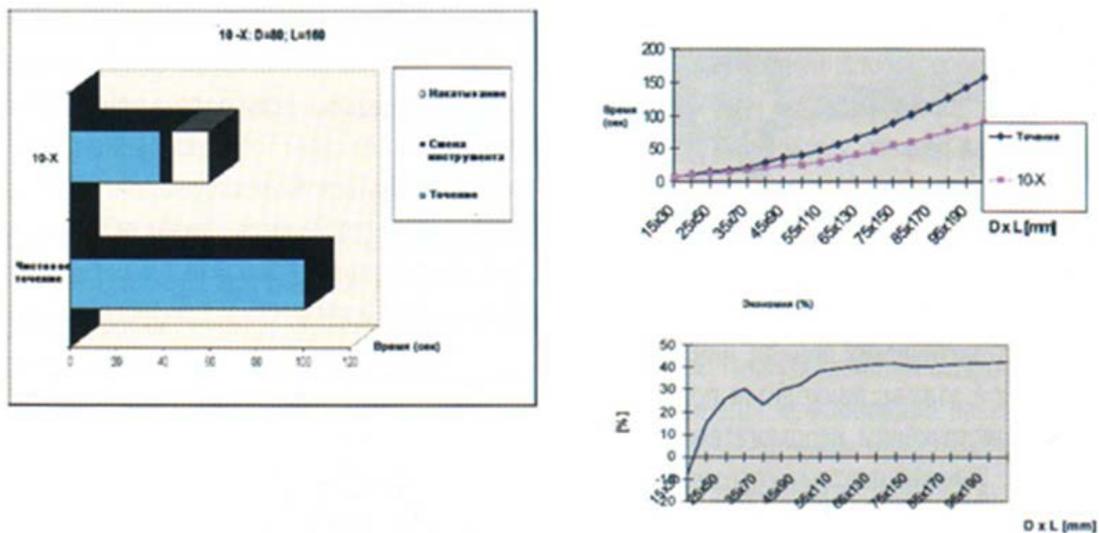


Рис. 2.9. Метод 10-Х

При обработке методом 10-Х предусмотрена смена инструмента продолжительностью 5 сек. Благодаря существенно более высокой подаче при точении при применении метода 10-Х:

- сокращается время токарной обработки;
- выигрыш времени настолько велик, что с учетом времени смены инструмента и времени накатного полирования общее время обработки существенно меньше;
- улучшается контроль стружкообразования (отсутствует тонкая витая стружка);
- увеличивается стойкость кромки и, соответственно, сокращаются простои на замену инструмента.

Из-за влияния времени смены экономия значительно больше при обработке крупных деталей, чем мелких. Это отражено на диаграмме справа (рис. 2.9). Проанализированы время обработки и экономия при обработке различных деталей с соотношением диаметра к длине 1:2 в диапазоне от 15×30 (диаметр × длина) до 100×200. Для диаметров более 25 мм экономия времени при использовании метода 10-Х составляет от 10 до 40 %. Для диаметров менее 20 мм экономия существенно меньше либо тонкое точение более эффективно.

Вопросы для самопроверки

1. Назовите статические и динамические методы поверхностно-пластического деформирования (ППД).
2. Опишите сущности процесса и схем обработки упрочняющего накатывания.
3. Каковы границы применения методов накатывания?
4. В чем состоят преимущества метода упрочняющего накатывания по сравнению с дробеструйной обработкой?
5. В чем суть методов врезания и подачи при упрочняющем накатывании?
6. В чем суть комбинированного метода 10-Х?

ЛЕКЦИЯ 6. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ УПРОЧНЯЮЩЕГО РАСКАТЫВАНИЯ, ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ОБРАБОТКИ И ДРОБЕСТРУЙНОГО УПРОЧНЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Схемы раскатывания поверхностей, описание конструкции раскатных устройств, технологические возможности метода центробежной обработки, технология пневмодробеструйного упрочнения: достоинства и недостатки метода, технология гидродробеструйного упрочнения

Технологические процессы и инструменты для упрочнения методами ППД отверстий, особенно небольшого диаметра, отличаются большей сложностью, чем процессы и инструменты для упрочнения наружных поверхностей. Для этого применяют дорнование, развальцовку, раскатывание шариковыми и роликовыми раскатниками. Наиболее широкое применение нашло раскатывание отверстий устройствами сепараторного типа, в кото-

рых ролики расположены по окружности в гнездах сепаратора (разделителя) под углом самоподачи φ к оси обрабатываемого отверстия (рис. 2.10, а).

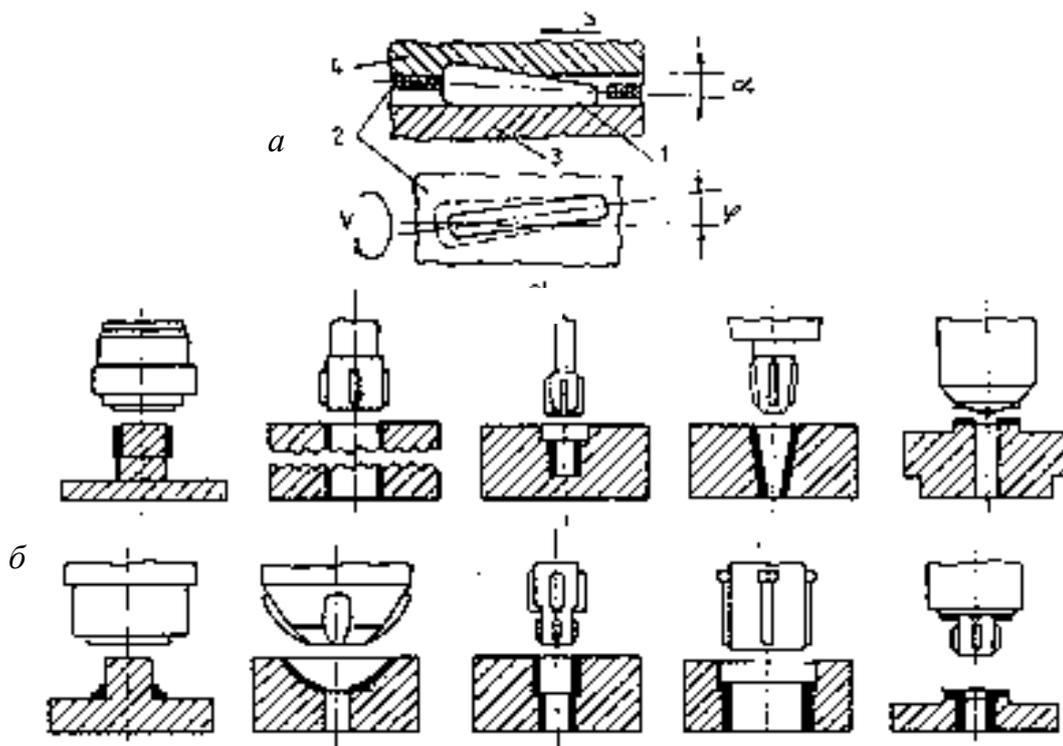


Рис. 2.10. Схемы раскатывания поверхностей различной формы и основные типы раскатных устройств:

а – схема процесса (1 – ролик; 2 – сепаратор; 3 – опорный конус; 4 – обрабатываемая поверхность); б – основные типы устройств

Раскатные устройства (раскатники) состоят из роликов, сепаратора и опорного (нажимного) конуса. Ролики имеют цилиндрическую или коническую форму. Под действием опорной поверхности конуса и осевой силы они внедряются в обрабатываемую поверхность под углом вдавливания [6]. В месте контакта возникают большие напряжения сжатия и упруго-пластические деформации микронеровностей и основного металла детали. Перекатываясь по обрабатываемой поверхности и перемещаясь вдоль отверстия, ролики производят последовательное упрочнение всего отверстия. Конструктивная схема регулируемого роликового раскатника «жесткого» типа с коническими роликами для обработки отверстий диаметром 9...25 мм представлена на рис. 2.11.

Раскатник состоит из оправки 12 с конической концевой частью, на которой в сепараторе 4 установлены конические ролики 13, удерживаемые обоймой 2. Сепаратор 4 прижимается пружиной 6 к упорному подшипнику 8, удерживая ролики на конусе оправки.

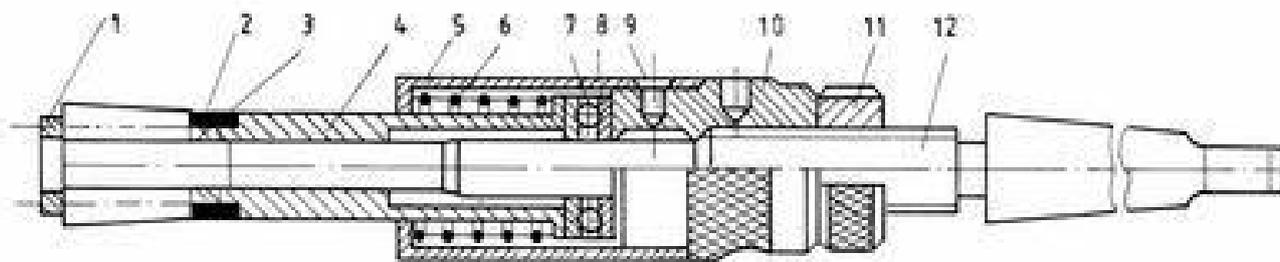


Рис. 2.11. Конструктивная схема роликового раскатника:
 1 – упоры; 2 – обойма; 3 – сухарики; 4 – сепаратор; 5 – втулка;
 6 – пружина; 7, 8 – подшипник упорный; 9 – винт; 10 – гайка;
 11 – гайка стопорная; 12 – оправка; 13 – ролики

Изменяя положение оправки 12 относительно гайки 10, можно регулировать диаметр рабочей части раскатника с роликами. Контргайка 11 служит для закрепления оправки 12 относительно гайки 10 после регулировки диаметра раскатника. Пружина 6 поджимает сепаратор 4 к опорному подшипнику только в процессе раскатки (в рабочем положении). При обратном ходе раскатника пружина 6 сжимается, ролики 13 смещаются в сторону меньшего диаметра конуса, уменьшается диаметр рабочей части раскатника (по роликам), и он свободно выводится из отверстия. Четыре ролика в раскатнике должны иметь допуск на диаметр не более 0,002 мм. Крепление раскатника на станке обычно осуществляется с помощью шарнирных соединений или в плавающих патронах, обеспечивающих его самоустановку в отверстии [6].

Основными параметрами, определяющими качество раскатывания отверстий, являются: размеры, конфигурация и количество роликов, угол вдавливания роликов α , натяг i , подача продольная S , угол установки роликов φ , скорость обработки V , число рабочих ходов, СОТС. Из режимов раскатывания отверстий основным является натяг, который определяется как разность между диаметром раскатника и диаметром предварительно обработанного отверстия.

Примерный предварительный натяг и припуск под раскатывание можно выбрать по справочным таблицам, составленным на основании накопленного опыта. Продольная подача на один ролик выбирается в за-

висимости от обрабатываемого материала и требуемой шероховатости поверхности. Окружная скорость раскатывания многороликовым инструментом может изменяться в пределах от 2 до 200 м/мин. Она существенно не влияет на состояние обработанной поверхности, но при больших скоростях происходят интенсивное тепловыделение, нагрев и тепловые деформации технологической системы, снижается стойкость инструмента и осложняется процесс раскатывания. Поэтому не рекомендуется вести раскатывание без СОЖ на скоростях более 70 м/мин [6].

Центробежная обработка

Центробежная обработка является одной из разновидностей ударной обработки шариками или роликами, свободно установленными во вращающемся диске (рис. 2.12).

Удар по обрабатываемой поверхности наносится рабочим телом под действием центробежных сил. Сила удара носит импульсный характер и определяется параметрами центробежной обработки, к которым относятся: окружная скорость V упрочнителя, натяг i , число шаров в сепараторе Z , диаметр шаров $d_{ш}$, скорость обрабатываемой поверхности детали V_d , продольная подача S , число рабочих ходов k , масса m рабочего тела [6].

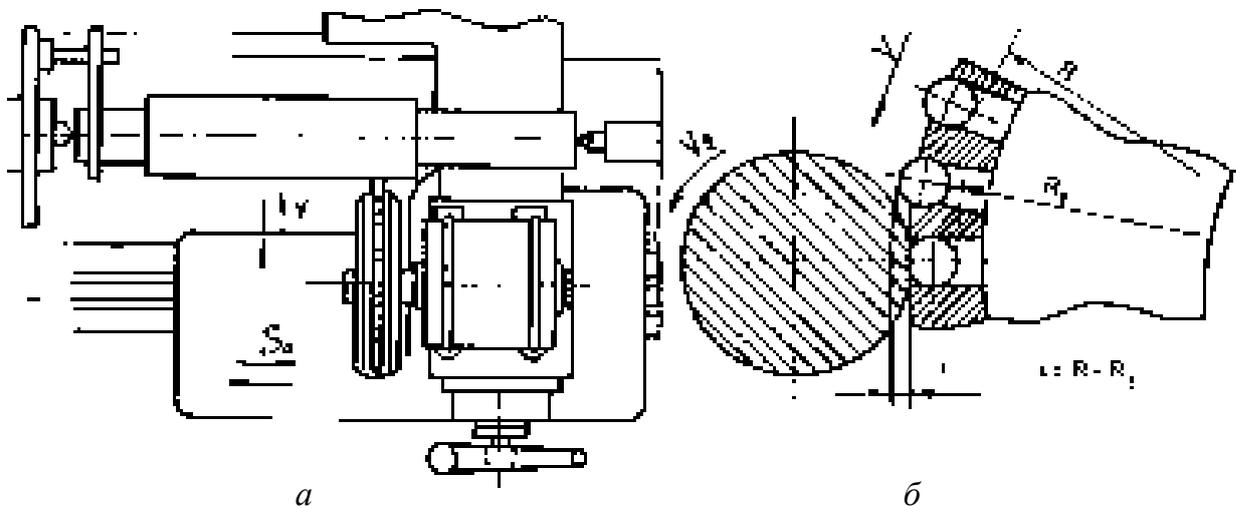


Рис. 2.12. Схема центробежного метода обработки:
a – расположение устройства на станке; *б* – зона взаимодействия шариков с обрабатываемой поверхностью

Количество ударов шаров, приходящихся на 1 мм^2 обрабатываемой поверхности, определяется по формуле

$$K = \frac{Z \cdot n}{\pi \cdot d \cdot S \cdot n_d}, \quad (2.1)$$

где d – диаметр обрабатываемой поверхности, мм; n – частота вращения диска упрочнителя, мин^{-1} ; Z – число шаров в сепараторе; n_d – частота вращения обрабатываемой детали, мин^{-1} ; S – продольная подача, мм/об.

В процессе нанесения удара металл на поверхности отпечатка деформируется неравномерно. Наибольшая деформация происходит на входе шара в металл, а наименьшая – на выходе шара из лунки. Площадь отпечатка зависит от всех перечисленных выше параметров центробежной обработки, а также от твердости обрабатываемого материала. Скорость обрабатываемой детали и подача упрочнителя оказывают слабое влияние на площадь отпечатка. Наиболее сильным технологическим фактором является величина натяга i и скорость упрочнителя V .

Оптимальные параметры центробежной обработки обеспечивают многократное снижение исходной шероховатости поверхности (рис. 2.13). Так, при обработке поверхностей с исходной шероховатостью $R_a = 5 \dots 20 \text{ мкм}$ после обработки получена шероховатость $R_a = 0,63 \dots 1,25 \text{ мкм}$, при исходной шероховатости $R_a = 0,32 \dots 0,63 \text{ мкм}$ шероховатость после обработки стала $R_a = 0,08 \dots 0,16 \text{ мкм}$.

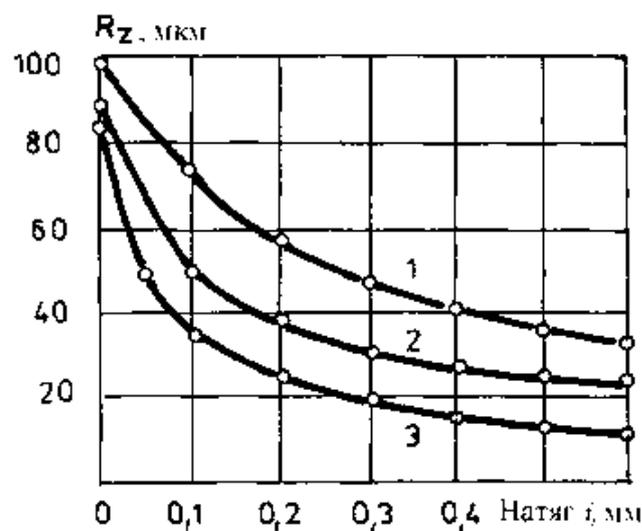


Рис. 2.13. Влияние натяга на шероховатость поверхности при центробежной обработке стали 45:
 1 – $V = 50 \text{ м/с}$; 2 – $V = 25 \text{ м/с}$; 3 – $V = 12,5 \text{ м/с}$

Исходная шероховатость с $R_a = 0,08$ мкм в процессе обработки практически не изменяется. В зоне удара возникает температура 200...400 °С. Глубина пластически деформированного слоя может достигать 0,8 мм. Степень наклепа стали при этом достигает до 45 %; чугуна – до 30–60 %, латуни – до 60 %.

Параметры упрочнения выбираются исходя из свойств обрабатываемых материалов, конструкции и требований к детали: $V = 8...40$ м/с (для более твердых материалов скорость больше); $V_d = 30...90$ м/мин; $i = 0,05...0,5$ мм; $Z = 4...30$ (на 1 рад); $S = 0,02...0,2$ мм/об; $d = 5...16$ мм [6].

Пневмодробеструйное (ПДУ) и гидродробеструйное (ГДУ) упрочнение

В основе процессов дробеупрочнения лежит динамическое воздействие дроби на ПС детали, при котором происходит его пластическая деформация и формируются остаточные напряжения сжатия.

На рис 2.14 приведена схема установки для ПДУ деталей типа трубопроводов и валов [2].

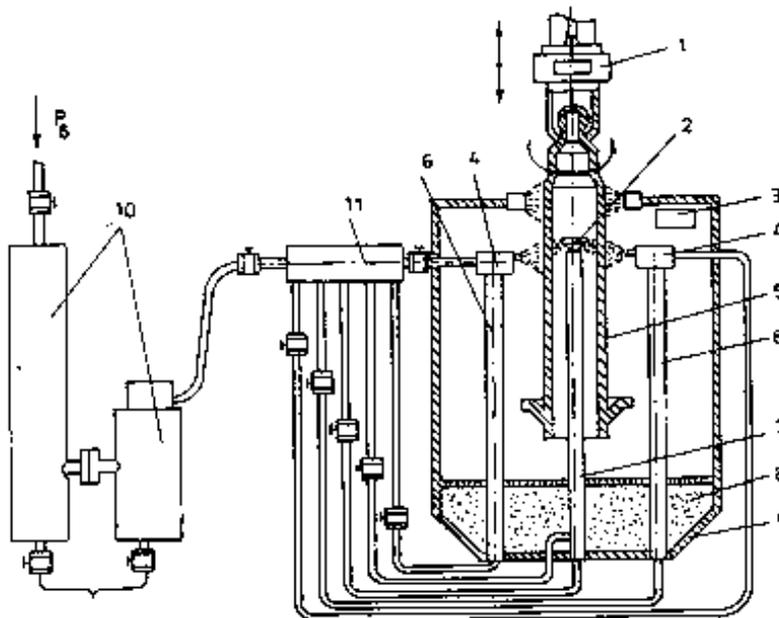


Рис. 2.14. Схема пневмодробеструйной установки для упрочнения деталей (валов):

- 1 – устройство для крепления, вращения и перемещения детали;
- 2 – упрочнитель внутренний; 3 – камера; 4 – рабочее сопло; 5 – деталь;
- 6, 7 – каналы воздушные; 8 – дробь; 9 – дробесборник;
- 10 – фильтры воздушные; 11 – коллектор

Деталь 5 устанавливается вертикально в устройстве 1, которое может ее вращать с требуемой частотой, опускать в установку 3 для обработки и вынимать из установки после обработки. Сжатый воздух через фильтр 10 подается к коллектору 11, откуда он поступает к рабочим соплам 4, а также по трубопроводу 7 к рабочим соплам эжектора внутреннего упрочнителя 2. В процессе упрочнения деталь перемещается вдоль оси и вращается. Отработанная дробь 8 падает в дробесборник 9 и поступает в зону транспортирующих эжекторов, рабочих сопел и внутреннего упрочнителя.

На рис 2.15 приведена схема ПДУ поверхностей диска ротора паровой турбины. Оси рабочих сопел располагаются под углом 90° к плоской упрочняемой поверхности или 45° к поверхностям с радиусными переходами.

Расстояние от среза насадки сопла до упрочняемой поверхности должно находиться в пределах 100...200 мм. Скорость перемещения одного сопла по поверхности определяется диаметром эффективного ядра распыла и временем упрочнения до «насыщения». Например, на расстоянии от среза сопла 150 мм диаметр эффективного ядра распыла равен 50 мм. При упрочнении внутренних поверхностей расстояние от упрочнителя до обрабатываемой поверхности не должно быть меньше 15 мм.

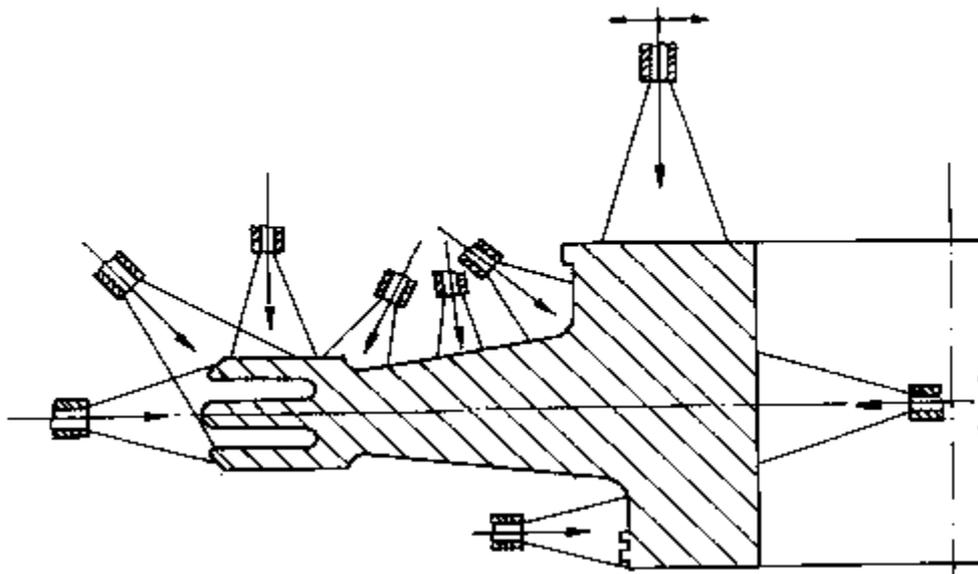


Рис. 2.15. Схема дробеструйного упрочнения диска ротора паровой турбины

В качестве деформирующих тел используется стальная литая дробь (ДСЛ) диаметром 0,5...1 мм или стеклянные шарики. Скорость полета дроби под действием струи сжатого воздуха 1...100 м/с при давлении 0,1...0,5 МПа. Стеклянные шарики применяются для упрочнения деталей, у которых

должна быть высокая химическая чистота поверхности. Основные характеристики состояния ПС при ДМУ и ПДУ (шероховатость, степень и глубина наклепа, остаточные напряжения сжатия) определяются диаметром дроби, скоростью ее полета, углом атаки потока дроби и продолжительностью обработки.

Недостатком ПДУ является то, что режимы упрочнения отличаются большой нестабильностью по энергии удара из-за малой точности размера дроби, колебаний давления воздуха в сети. Соответственно ПС после упрочнения также имеет неравномерные свойства. В большинстве случаев происходит некоторое увеличение исходной шероховатости, если $R_a \leq 0,7...1,25$ мкм. Локальный нагрев тонкого ПС в месте удара дроби снижает эффект наклепа и смещает максимальное значение микротвердости в подповерхностный слой [2].

Сущность *гидродробеструйного упрочнения* (ГДУ) состоит в том, что пластическое деформирование поверхностного слоя осуществляется стальными шариками в подаваемой под давлением струе трансформаторного масла или эмульсии (рис. 2.16).

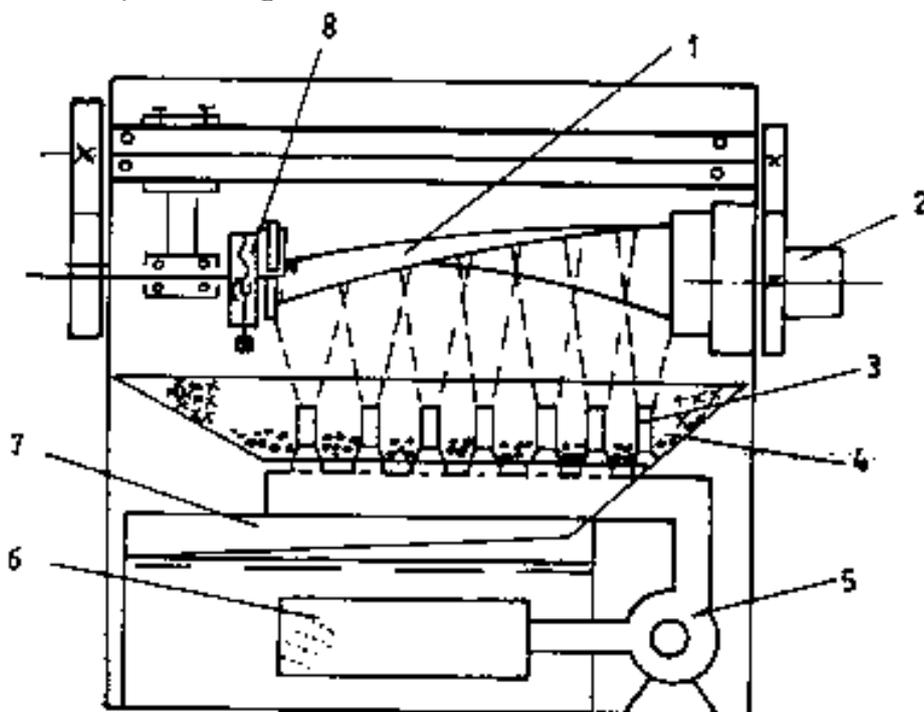


Рис. 2.16. Схема устройства для гидродробеструйного упрочнения лопаток с предварительным упругим изгибом пера:

- 1 – лопатка; 2 – привод вращения лопатки; 3 – эжекторные сопла;
- 4 – дробь; 5 – гидронасос; 6 – всасывающий патрубок с фильтром;
- 7 – бак с маслом; 8 – механизм предварительного изгиба лопатки

Удары шариков по обрабатываемой поверхности происходят через жидкую пленку, которая практически устраняет трение между шариками и металлом. Это способствует более равномерному распределению нагрузки в зоне контакта шариков и ПС, снижает выделение тепла и трение, а жидкость частично охлаждает обрабатываемую поверхность. Коэффициент полезного действия процесса ГДУ и ПГДУ более высокий, чем ПДУ, так как непосредственно на пластическую деформацию ПС расходуется большая доля кинетической энергии шариков.

В качестве рабочих тел в установках ГДУ и ПГДУ обычно применяют стальные шарики с шероховатостью поверхности $R_a \leq 0,63$ мкм. При исходной шероховатости $R_a = 0,16 \dots 0,32$ мкм ГДУ ухудшает шероховатость, повышая ее до $R_a = 0,6 \dots 0,7$ мкм; если исходная шероховатость поверхности $R_a \geq 1,25$ мкм, то ГДУ ее снижает до $R_a \approx 0,63$ мкм.

Повышение давления жидкости приводит к росту скорости полета дроби, а значит, к увеличению энергии удара. В результате происходит более глубокое проникновение пластических деформаций в ПС и повышение степени наклепа. Так, например, при ГДУ титанового сплава с $P = 0,1$ МПа толщина ПС с искаженной кристаллической решеткой составила 80 мкм, при $P = 0,7$ МПа уже 340 мкм.

Вопросы для самопроверки

1. Приведите схемы раскатывания поверхностей и опишите конструкции раскатных устройств.
2. Расскажите о технологических возможностях метода центробежной обработки.
3. Опишите технологию пневмодробеструйного упрочнения. Назовите достоинства и недостатки метода.
4. В чем состоит сущность гидродробеструйного упрочнения?

ЛЕКЦИЯ 7. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ УДАРНО-АКУСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Схема ударно-акустической обработки, явление объемной микропластичности; инструмент, применяющийся в технологии ударно-акустической обработки; этапы методики проектирования операции ударно-акустической обработки

Ударно-акустическая обработка (УАО) – один из методов поверхностного пластического деформирования. Благодаря данному методу возрастает микротвердость поверхностей, уменьшается шероховатость, улучшается совместимость материалов деталей пар трения, снижается износ во время приработки.

Разработанные, исследованные и внедренные в практику в 1972 году доктором технических наук, профессором А. В. Телевным основы модифицирования поверхностного слоя на основе объемной микропластичности и созданный на их основе метод ударно-акустической обработки (УАО) обеспечили внедрение в серийное производство авиационной и космической техники, а также в ремонтное производство для автомобильной промышленности механических систем для УАО. Однако в настоящее время отсутствует четкая методика назначения режимов УАО при обработке поверхностей деталей пар трения [10].

Учитывая возрастающие требования к качеству и необходимость обеспечения долговечности деталей в процессе эксплуатации, актуальными являются исследования, направленные на разработку методики назначения рациональных режимов обработки, при которых обеспечивается высокая износостойкость поверхностного слоя, и на разработку методики проектирования технологической операции УАО.

Основы процесса ударно-акустической обработки

Согласно ГОСТ 18296-72 методы поверхностно-пластического деформирования (ППД) подразделяют на статические и ударные. При обработке ударными методами ППД происходит перековка (наклеп) поверхностного слоя деталей. При ударе через промежуточную среду (смазку) в поверхностном слое формируются остаточные напряжения сжатия, что способствует повышению конструкционной прочности деталей, достижению необходимой твердости поверхности, получению нужного параметра

шероховатости, улучшению антифрикционных свойств и, следовательно, повышению надежности всего изделия [12].

Среди множества разновидностей методов ППД наиболее эффективным является ударно-акустическая обработка (УАО) инструментом, колеблющимся с ультразвуковой частотой. Сравнительный анализ технологических методов обработки поверхностей свидетельствует о том, что метод УАО в наибольшей степени позволяет изменять параметры поверхностного слоя. В то же время отсутствуют методики назначения технологических режимов обработки для достижения необходимых критериальных значений качества поверхности изделий из различных обрабатываемых материалов.

Ультразвуковой наклеп – один из новых методов упрочнения пластическим деформированием стальных деталей машин и инструмента, имеющих высокую исходную твердость. Сущность его в том, что стальной или твердосплавный шарик, жестко связанный с концентратором ультразвукового преобразователя, ударяет по упрочняемой поверхности с частотой 18...22 кГц и одновременно с этим вдавливается в поверхность под постоянным давлением, создаваемым грузовым натяжным устройством. При этом переменная ударная сила может достигать значительной величины [12]. При наложении на боек (шарик или ролик) колебаний ультразвуковой частоты процесс упрочнения значительно интенсифицируется, что позволяет при весьма малых статических усилиях нагружения обеспечить высокие эксплуатационные характеристики обработанных поверхностей. Возможность снижения усилий объясняется и высокой температурой процесса, достигающей 1000...1200 °С. При этом упрочнение сводится к термопластическому деформированию материала поверхностного слоя инструментом, вибрирующим с частотой 18...25 кГц.

Следует отметить, что УАО с внедрением твердых смазок является малооперационной технологией. С помощью данного вида обработки за одну операцию решается несколько задач: достижение необходимой твердости поверхностного слоя, обеспечение необходимого параметра шероховатости, получение необходимого микрорельефа поверхности, обеспечение хорошей конструкционной прочности, повышение совместимости материалов. Также реализуются технический и экономический принципы построения технологического процесса. С помощью данной

малооперационной технологии мы получаем требуемый резерв качества изделия [12].

При УАО с внедрением твердой смазки реализуется идея удара через промежуточную среду, в результате чего повышается совместимость материалов в парах трения.

Схема ударно-акустической обработки представлена на рис. 2.17. Индентор 2 ультразвукового инструмента, выполненный в виде шарика или полуцилиндра, связан с концентратором ультразвуковых колебаний 3. Колебания поступают от магнитострикционного преобразователя 4. Индентор может быть жестко закреплен (припаян), но может и не иметь жесткого контакта с преобразователем. Инструмент прижимается с усилием $P_{см}$ к вращающейся заготовке 1.

Источником ультразвуковых колебаний является ультразвуковой генератор 5, обеспечивающий частоту колебаний $f = 8...22$ кГц. Ультразвуковые колебания значительно снижают сопротивление пластической деформации поверхностного слоя заготовки 1.

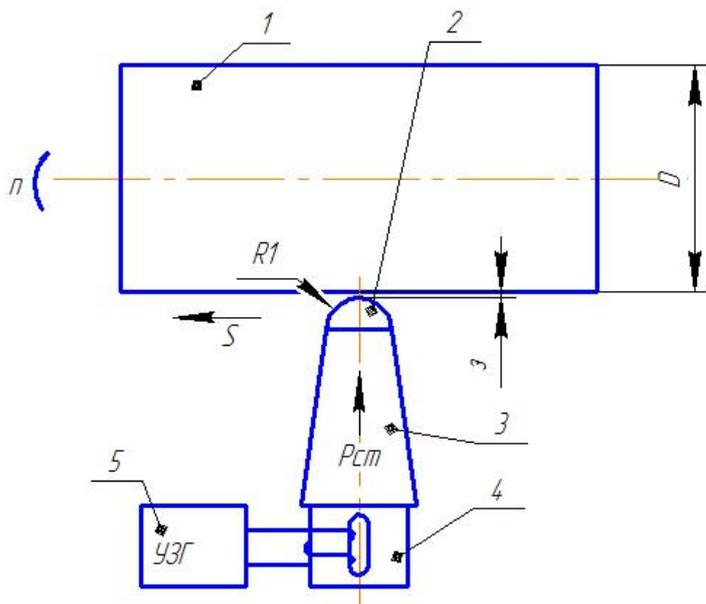


Рис. 2.17. Схема ударно-акустической обработки:

1 – обрабатываемая деталь; 2 – индентор ультразвукового инструмента;
3 – концентратор ультразвуковых колебаний; 4 – магнитострикционный преобразователь; 5 – ультразвуковой генератор

На рис. 2.17 представлены следующие параметры УАО:

- 1) D – диаметр заготовки, мм;
- 2) R_1 – радиус индентора ультразвукового инструмента, мм;

- 3) n – частота вращения заготовки, об/мин;
- 4) S – продольная подача ультразвукового инструмента, мм/об;
- 5) P_{cm} – статическая сила прижима ультразвукового инструмента, Н;
- 6) ξ – амплитуда колебаний индентора, мкм;
- 7) f – частота магнитострикционного преобразователя, кГц.

Процессы, происходящие в поверхностном слое при УАО

Процессы, происходящие в поверхностном слое при УАО с внедрением твердой смазки, впервые были изучены доктором технических наук, профессором А. В. Телевным. Экспериментально подтверждено, что при высоких удельных нагрузках в глубине металла образуются высокопрочные аморфные структуры. Это свойство получило название объемной микропластичности [12].

А. В. Телевным была разработана физическая модель проявления объемной микропластичности твердых металлов, которая предусматривает образование убывающего микрообъема и формирование высокопрочной структуры по трассе его движения, образование зон сжатия – растяжения и интерференцию металлических волн (рис. 2.18).

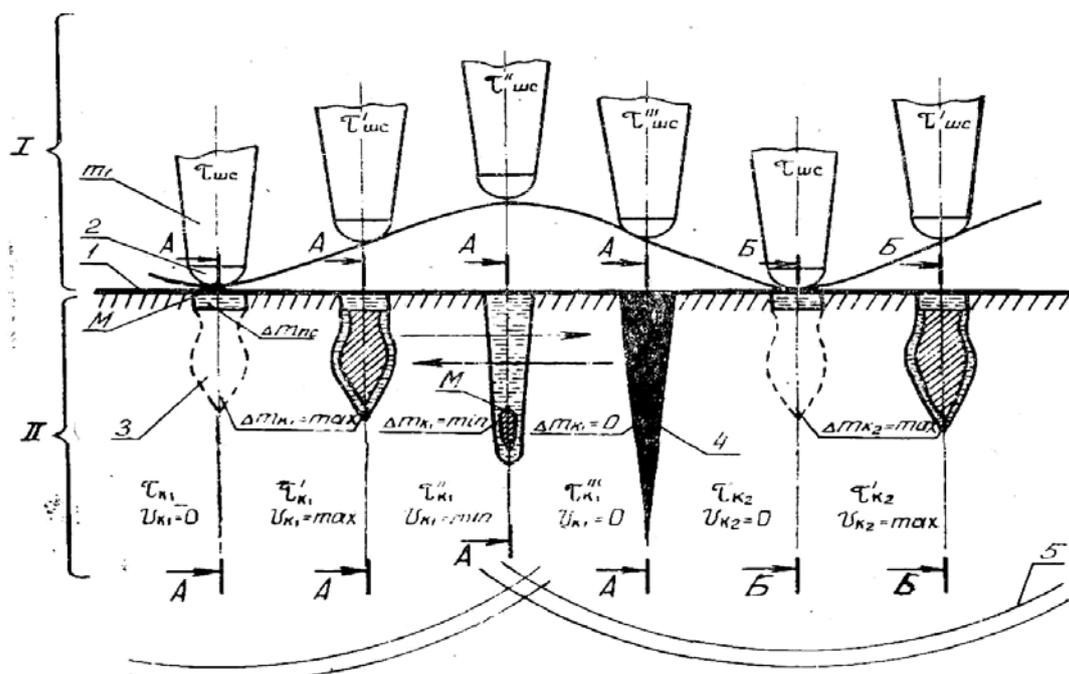


Рис. 2.18. Физическая модель проявления объемной микропластичности в твердых металлах:

I – картина перемещения шарового сегмента;

II – картина структурных изменений металла в сечениях А-А, Б-Б

Динамическая нагрузка прикладывается к поверхности через промежуточную среду 1 и без нее шаровым сегментом 2 или шаром. При достижении пороговой величины нагружения внутри металла образуется конусообразный микрообъем 3. В процессе движения конус 3 взаимодействует с поликристаллической структурой, в результате чего происходят уменьшение массы и перестройка структуры с формированием высокопрочного конуса скольжения 4. В момент обмена кинетической энергией при отрыве шарового сегмента электромеханической системы происходит резкий скачок скорости продвижения конусообразного микрообъема вглубь металла ($\gg 100$ м/с). Это вызывает ударные продольно-пластические волны 5, которые создают на своем пути зоны сжатия – растяжения и интерференцию металлических волн при повторении рассматриваемого процесса с заданным шагом.

В процессе продвижения конуса скольжения вглубь металла его шлейф обогащается инородными материалами, например дисульфидом молибдена, и представляет собой высокопрочную структуру (стеклометалл) с ионными, ковалентными и металлическими связями [12].

Объемная микропластичность положительно влияет на прочность металлов и обеспечивает стабильность повышения ресурса деталей механизмов и машин.

Конструкционная прочность повышается в результате обновления поверхностного слоя за счет его перековки с ультразвуковой частотой, в результате чего устраняются наследственные дефекты от механической обработки, формируется микрорельеф с большими радиусами кривизны при вершинах и впадинах (рис. 2.18).

По результатам исследований износостойкости образцов, обработанных с помощью УАО с внедрением дисульфида молибдена, установлено:

- 1) микротвердость поверхности после УАО повышается в 1,5...2 раза (сравнение с образцами после механической обработки);
- 2) износ и момент трения уменьшаются в 10...15 раз;
- 3) время наработки образцов на машине трения СМЦ-2 до появления схватывания и задиров после УАО с внедрением дисульфида молибдена составляло 30...66 мин, а после механической обработки – 1 мин;

4) твердость не является фактором, определяющим износостойкость после УАО поверхности с внедрением твердой смазки, – основное влияние на триботехнические характеристики оказывают не твердость и микротвердость, а свойства аморфизированного композиционного материала, полученного в результате смешения веществ и образования новых фаз;

5) для сохранения оптимальных зазоров в тяжело нагруженных парах трения в течение заданного ресурса необходимо, чтобы глубина упрочненного слоя была не менее допуска на односторонний износ детали, а шаг армирования – обратно пропорционален удельным нагрузкам в паре трения [12].

Ультразвуковой инструмент, применяемый при УАО

При УАО большое значение имеют правильно подобранный ультразвуковой инструмент и корректно рассчитанные параметры. Основными задачами при выборе ультразвукового инструмента являются расчет резонансной длины концентратора, подбор материала, обладающего необходимой добротностью, выбор формы концентратора.

Ультразвуковой инструмент должен быть универсальным с точки зрения обработки как технологичных, так и нетехнологичных поверхностей. Конструкция не должна допускать образования высоких концентраций напряжений, а поверхности инструмента должны быть полированные. Исполнительная поверхность должна длительное время сохранять заданную геометрию, необходимо предусмотреть возможность ее восстановления. Конструкция должна обеспечивать колебания в зоне обработки при заданном усилии подачи. Места соединений должны иметь минимальное акустическое сопротивление.

Этим требованиям отвечают инструменты для обработки наружных (рис. 2.19) и внутренних (рис. 2.20) поверхностей [12].

Инструмент ультразвуковой состоит из входного стержневого волновода 1 (рис. 2.19) с резьбовой частью 2, каскада ступеней концентратора 3, трапецеидальной пластины 4 и твердосплавной пластины 5.

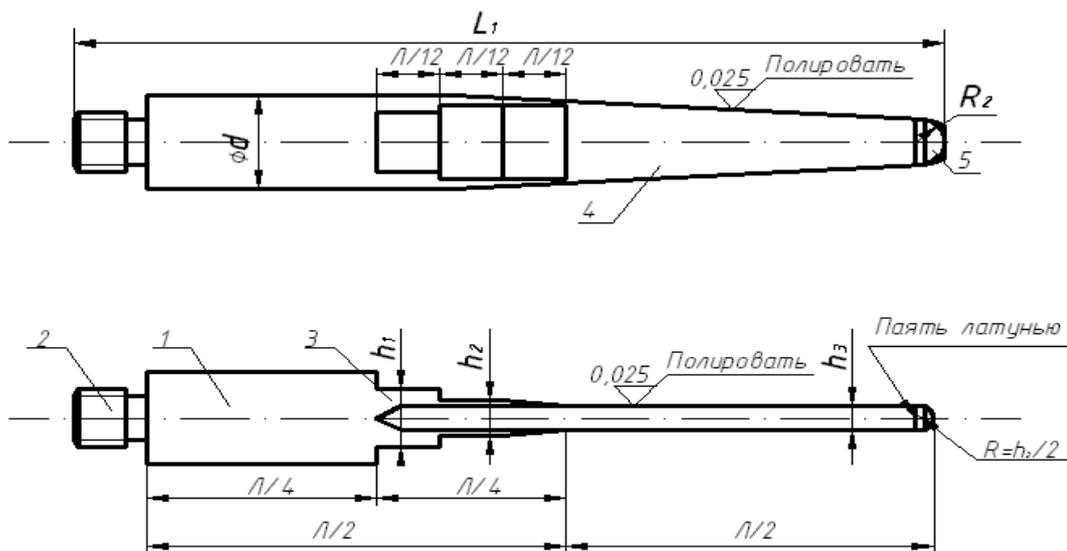


Рис. 2.19. Ультразвуковой инструмент для обработки наружных поверхностей:

1 – стержневой волновод; 2 – резьбовая часть волновода; 3 – концентратор;
4 – трапецидальная пластина; 5 – твердосплавная пластина

Ультразвуковой инструмент для обработки внутренних поверхностей (рис. 2.20) имеет криволинейную ось на последней четверти волны с радиусом $\lambda/4$ на величину $\lambda/8$. К основанию трапецидальной пластины припаяется латунью твердосплавная пластина 5. При пайке латунью не допускаются раковины, толщина слоя латуни должна быть минимальной.

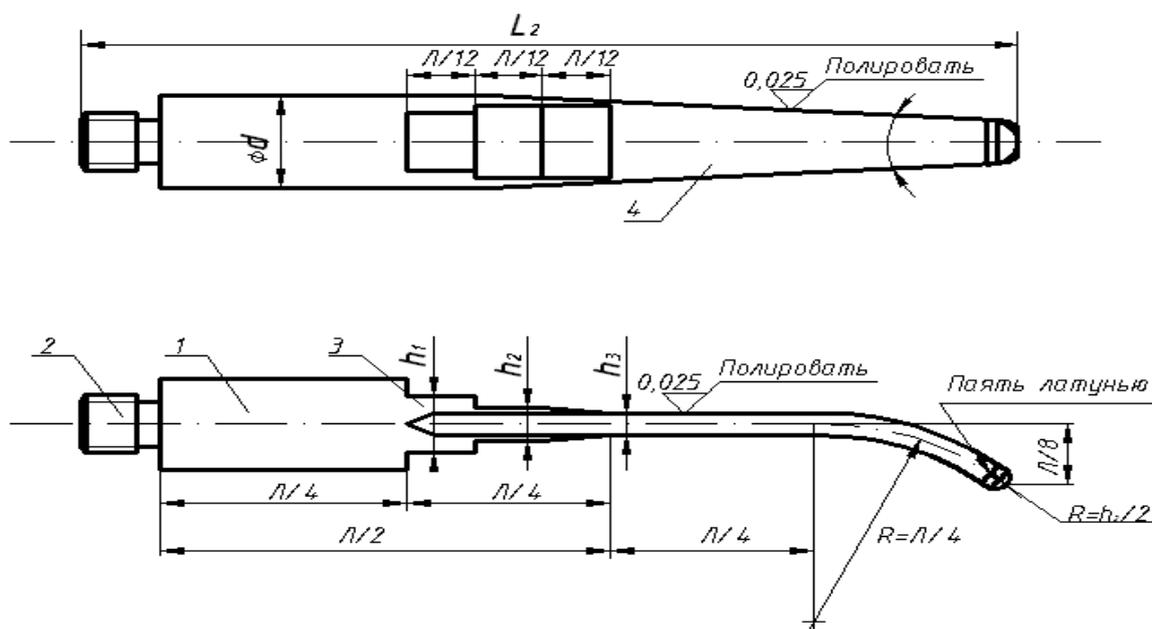


Рис. 2.20. Ультразвуковой инструмент для обработки внутренних поверхностей:

1 – стержневой волновод; 2 – резьбовая часть волновода; 3 – концентратор;
4 – трапецидальная пластина; 5 – твердосплавная пластина

Производительность ультразвукового инструмента для обработки внутренних поверхностей выше в два раза, так как одновременное соударение происходит в двух точках. Для этого боковые поверхности твердосплавной пластины имеют закругления радиусом 2 мм. При технологической наладке обеспечивается отставание одного из торцов твердосплавной пластины на заданный шаг и продольная подача увеличивается в два раза [12].

Методика проектирования операции ударно-акустической обработки

Методика проектирования операции УАО (рис. 2.21) разработана на основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований. Представленная методика позволяет назначать рациональные режимы обработки в зависимости от коэффициентов перекрытия и обработанности для материалов группы углеродистых конструкционных качественных сталей и включает следующие этапы [10]:

1. Ввод исходных данных:

- 1) вид обрабатываемой поверхности (наружная цилиндрическая, внутренняя цилиндрическая, плоская);
- 2) размеры обрабатываемой поверхности (диаметр, длина, мм);
- 3) исходная микротвердость HV обрабатываемой поверхности;
- 4) исходная шероховатость обрабатываемой поверхности, мкм;
- 5) предел текучести σ_T материала заготовки, Н/мм²;
- 6) коэффициенты перекрытия K_n^S и K_n^n и обработанности λ_S и λ_n в зависимости от материала заготовки (табл. 2.4) [10].

Таблица 2.4

Определение значений коэффициентов перекрытия и обработанности для некоторых конструкционных углеродистых качественных сталей

Материал	HV	K_n^S	λ_S	K_n^n	λ_n	λ_{nS}
Сталь 10	132	0,840	6,28	0,993	147,7	927,56
Сталь 35	178	0,815	5,41	0,992	127,2	688,15
Сталь 45	203	0,802	5,06	0,992	119,1	603,10
Сталь 55	260	0,776	4,47	0,990	105,2	470,24
Сталь 60	272	0,771	4,37	0,990	102,9	449,67

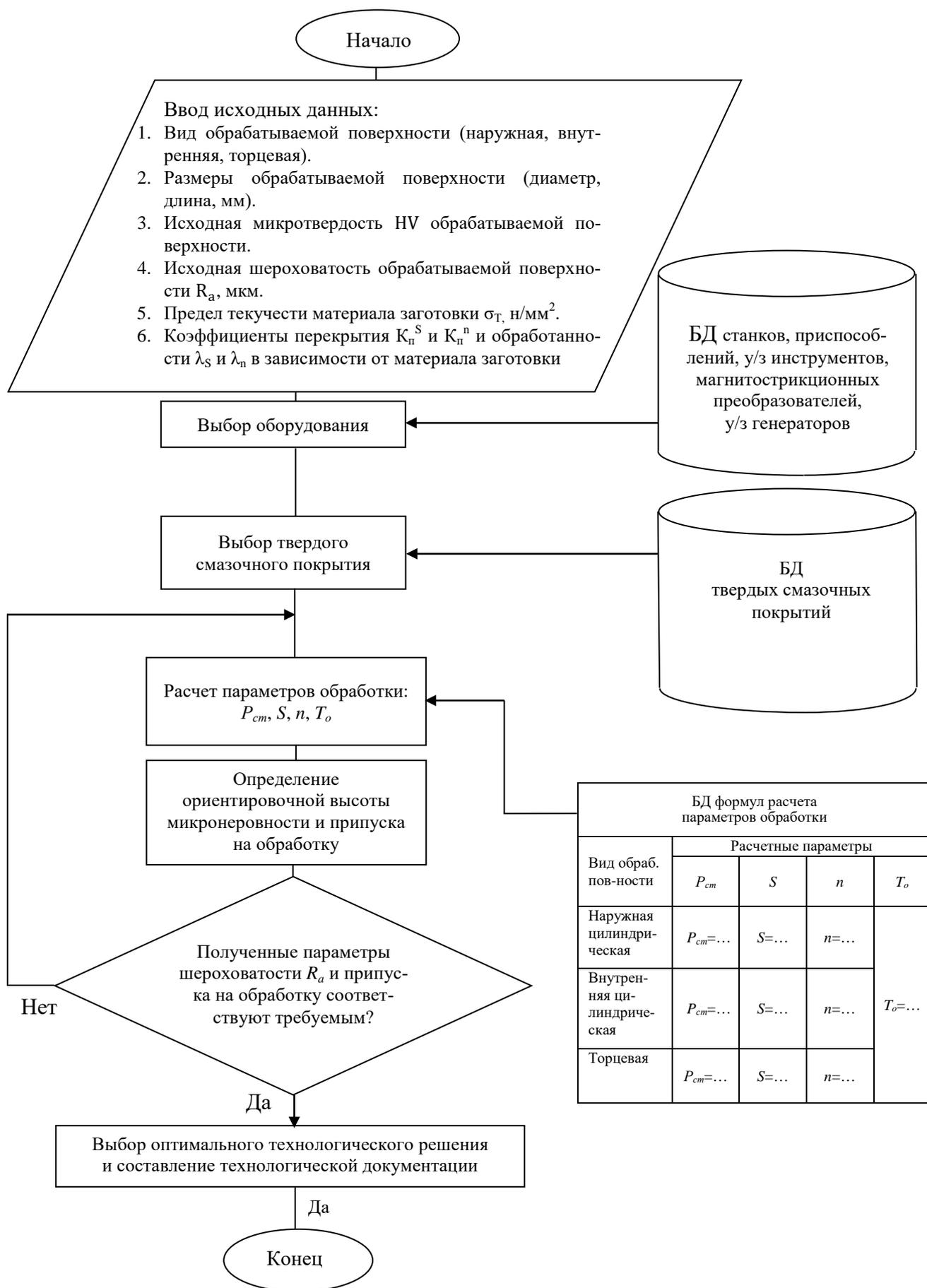


Рис. 2.21. Методика проектирования операции УАО

2. Выбор оборудования

Для выбора оборудования используется база данных имеющихся в наличии станков, приспособлений, ультразвуковых инструментов, магнитострикционных преобразователей, ультразвуковых генераторов:

а) *выбор твердого смазочного покрытия*: используется база данных твердых смазочных покрытий в зависимости от материала обрабатываемой детали и условий работы детали в узле;

б) *расчет параметров обработки*: для расчета параметров УАО используется база данных формул для расчета параметров обработки, представленная в табл. 2.5. Расчет параметров производится по формулам в зависимости от вида обрабатываемой поверхности (наружная цилиндрическая, внутренняя цилиндрическая, плоская) [10].

Таблица 2.5

Расчет основных параметров УАО

Поверхность		
наружная цилиндрическая	внутренняя цилиндрическая	плоская
Продольная подача у/з инструмента S , мм/об		Поперечная подача $S_{\text{поп}}$ у/з инструмента, мм/об
$S = 2\sqrt{R_1 h} \cdot [1 - K_n^S]$ $h = \frac{P_{cm}}{2\pi R_{np} \cdot \text{НД}}$	$S = 2\sqrt{R_1 h} \cdot [1 - K_n^S]$ $h = \frac{P_{cm}}{2\pi R_{np} \cdot \text{НД}}$	$S = 2\sqrt{R_1 h} \cdot [1 - K_n^S]$ $h = \frac{P_{cm}}{2\pi R_{np} \cdot \text{НД}}$

Поверхность		
наружная цилиндрическая	внутренняя цилиндрическая	плоская
Частота вращения заготовки n , об/мин		
$n = \frac{[1 - K_n^n] \cdot f \cdot \arccos\left(1 - \frac{R_1 h}{R_2(R_2 + R_1)}\right)}{3}$ $n = \frac{f \cdot \arccos\left(1 - \frac{R_1 h}{R_2(R_2 + R_1)}\right)}{3 \cdot \lambda_n}$	$n = \frac{[1 - K_n^n] \cdot f \cdot \arccos\left(1 - \frac{R_1 h}{R_2(R_2 - R_1)}\right)}{3}$ $n = \frac{f \cdot \arccos\left(1 - \frac{R_1 h}{R_2(R_2 - R_1)}\right)}{3 \cdot \lambda_n}$	$n = \frac{60f \cdot \sqrt{2R_1 h}}{\pi R_{cp}} \cdot [1 - K_n^n]$ $n = \frac{60f \cdot \sqrt{2R_1 h}}{\pi R_{cp} \lambda_n},$ <p>где R_{cp} – средний радиус обработки; при обработке торцевой поверхности без внутренней цилиндрической поверхности $R_{cp} = R_2/2$; при обработке торцевой поверхности с внутренней цилиндрической поверхностью $R_{cp} = R_{нар} + R_{внутр}/2$</p>
Статическая сила прижима $u/3$ инструмента $P_{ст}$, Н		
$P_{ст} = 1,33h \cdot \sigma_T \cdot \sqrt{R_1 R_2} \cdot (2 - K_n^S) \times \sqrt{1 - 4(1 - K_n^S)^2}$	$P_{ст} = 0,94\sigma_T \cdot \sqrt{R_1 h} \cdot (2 - K_n^S) \times \sqrt{1 - 4(1 - K_n^S)^2} \cdot \left[R_2 - \frac{R_1 h}{(R_2 - R_1)} \right]$	$P_{ст} = 1,33h R_1 \cdot \sigma_T \cdot (2 - K_n^S) \times \sqrt{1 - 4(1 - K_n^S)^2}$

3. Определение основного времени УАО

Основное (технологическое) время ударно-акустической обработки на металлорежущих станках T_0 определяется по формуле

$$T_0 = \frac{L \cdot i}{n \cdot S}, \text{ мин,} \quad (2.2)$$

где L – расчетная длина рабочего хода инструмента, мм;

i – число проходов инструмента;

n – частота вращения шпинделя, об/мин;

S – подача на оборот, мм/об.

4. Определение ориентировочной высоты микронеровностей после обработки и припуска на обработку

Ориентировочная величина микронеровностей R_z определяется согласно формуле (2.3) [10]:

$$R_z = \frac{S^2}{8R_1}, \quad (2.3)$$

где S – продольная подача инструмента, мм/об;

R_1 – радиус индентора ультразвукового инструмента, мм.

Ориентировочный припуск на обработку определяется по формуле (2.4).

$$Z_D = k(R_{z_{исх}} - R_z), \quad (2.4)$$

где $R_{z_{исх}}$ – высота исходных неровностей;

R_z – высота неровностей после обработки.

На основании проведенных экспериментов и данных заводской практики можно принять, что $k = 1,1 \dots 1,5$. Меньшие значения k следует брать для твердых (закаленных) сталей, а большие – для мягких, пластичных [10].

Если полученные параметры шероховатости и припуска на обработку соответствуют требуемым, то производится выбор оптимального технологического решения и составление технологической документации. Если не соответствуют, то необходимо заново провести расчет параметров обработки.

Вопросы для самопроверки

1. Опишите схему ударно-акустической обработки.
2. В чем состоит сущность явления объемной микропластичности? Какие процессы происходят в поверхностном слое детали при ударно-акустической обработке?
3. Какой инструмент применяется в технологии ударно-акустической обработки?
4. Из каких этапов состоит методика проектирования операции ударно-акустической обработки?

3. ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА

ЛЕКЦИЯ 8. ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПРИМЕНЕНИЕМ РАЦИОНАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕОМЕТРИИ ИНСТРУМЕНТА И РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ

Влияние скорости резания на остаточные напряжения при точении, влияние обрабатываемого материала и геометрии режущего инструмента на остаточные напряжения при строгании, распределение остаточных напряжений в поверхностном слое отверстий при сверлении, зенкеровании, развертывании

Исследованиями установлено, что геометрия инструмента, режимы обработки, состояние режущей кромки, СОЖ оказывают существенное влияние на состояние и качество поверхностного слоя деталей машин.

В работе [6] приведены результаты экспериментальных исследований обработки кольцевых образцов, изготовленных из стали марок 45, 80, У8А, а также низкоуглеродистой стали с содержанием углерода 0,08 %. Остаточные напряжения после строгания исследовались на плоских образцах, изготовленных из сталей 45, 12Х13; 20Х13; 15Х11МФ; 14Х17Н2, а также из титановых сплавов ВТ3-1; ВТ-5; ТС-5. Обработка проводилась резцами из быстрорежущих сталей Р18, Р14М5К25 и твердыми сплавами Т15К6, ВК8. Токарные резцы имели следующую геометрию: $\gamma = 15^\circ$; $\alpha = 8^\circ$; $\nu = 45^\circ$; $R = 1$ мм.

Основные исследования были проведены на стали 45 при следующих режимах: глубине резания $t = 1$ мм, подаче $S = 0,3$ мм/об, скорости резания $V = 50$ м/мин для резцов из Р18 и $V = 100$ м/мин для резцов из Т15К6, без охлаждения. Исследовался широкий диапазон скоростей резания – от 3 до 730 м/мин. Обработка образцов на скоростях резания до 100 м/мин проводилась резцами из Р18, а свыше 100 м/мин – резцами с пластинками твердого сплава Т15К6.

На рис. 3.1 приведены эпюры распределения остаточных напряжений в ПС (усредненные эпюры для четырех однотипных образцов) при скоростях резания от 3 до 100 м/мин.

При скорости резания 3 м/мин на всей глубине ПС действуют остаточные напряжения сжатия. С увеличением скорости резания их величина

снижается, а на глубине более 10 мкм формируются остаточные напряжения растяжения, которые опять переходят в остаточные напряжения сжатия на глубине 80...150 мкм (при скорости резания 17...50 м/мин) и на глубине 20...45 мкм (при скорости резания 77...100 м/мин).

При обработке со скоростью $V = 17$ м/мин в зоне деформации и в поверхностном слое хорошо видно образование нароста. Увеличение скорости резания сопровождается уменьшением нароста, а при скорости $V = 50$ м/мин он стал незначительным. При обработке со скоростью $V = 77$ м/мин нарост практически отсутствует.

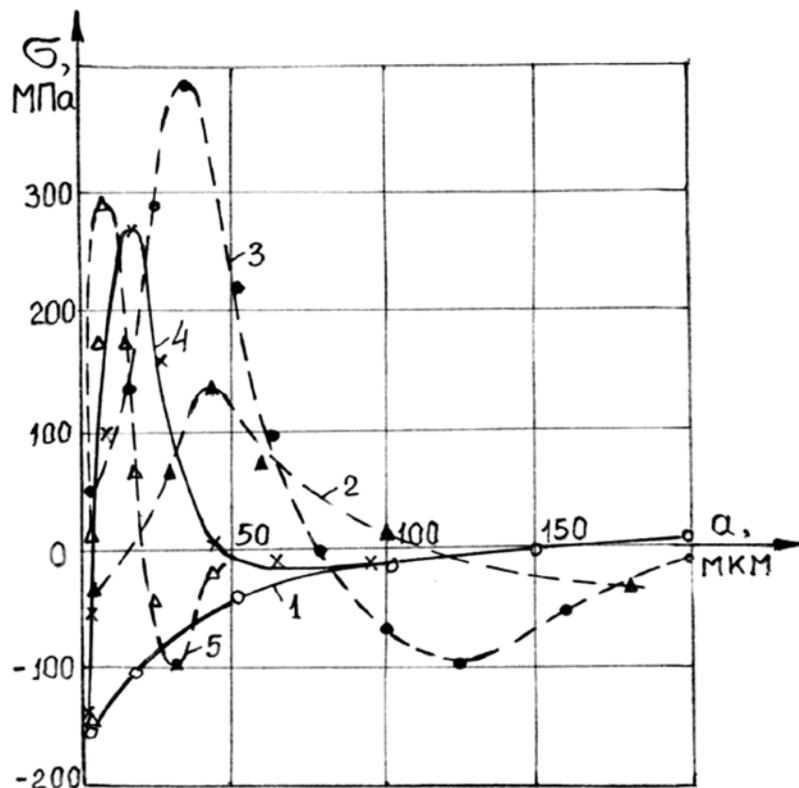


Рис. 3.1. Влияние скорости резания на тангенциальные остаточные напряжения при точении стали 45 резцом Р18:

1 – 3 м/мин; 2 – 17 м/мин; 3 – 50 м/мин; 4 – 77 м/мин; 5 – 100 м/мин

Большое влияние на структуру, напряженное состояние и физико-механические свойства оказывает температура в зоне резания. Измерения температуры в зоне резания термопарой показали, что она возрастает от 550 °С при $V = 100$ м/мин до 800...950 °С при $V = 700$ м/мин. Такая температура может вызывать термопластические деформации ПС, которые приводят к возникновению начальных напряжений растяжения.

Величина подачи определяет толщину срезаемого слоя металла, существенно влияет на интенсивность и глубину распространения пластических деформаций металла ПС. При обработке с подачей 0,1 мм/об глубина слоя с начальными напряжениями растяжения составляла 0,01 мм, а их максимальное значение было +90 МПа. С увеличением подачи до 0,3 мм/об глубина проникновения начальных напряжений растяжения возросла до 0,070 мм, а уровень напряжений до 400 МПа.

Материал режущей части инструмента оказывает влияние на процесс образования ПС и начальные напряжения в связи с большей или меньшей его адгезионной способностью, т. е. со способностью слипаться с обрабатываемым материалом. При обработке углеродистых сталей твердосплавными инструментами основным элементом, активизирующим адгезионные процессы, являются карбиды вольфрама. С повышением содержания карбидов вольфрама и титана в инструментальном материале увеличивается глубина распространения начальных напряжений растяжения, что связано с активизацией адгезионных процессов между передней, задней гранью инструмента и обрабатываемым материалом, приводящих к росту заторможенного слоя.

Большое влияние на пластические деформации в поверхностном слое оказывает геометрия режущего инструмента. С увеличением переднего угла уменьшаются сила резания и температура, коэффициент продольной усадки стружки, глубина проникновения пластических деформаций в ПС. Все это приводит к тому, что при работе острым резцом с большим положительным передним углом в поверхностном слое образуются высокие начальные напряжения, но они резко уменьшаются по глубине. При работе резцами с малыми передними углами начальные напряжения проникают на значительную глубину в ПС, однако максимальный их уровень меньше, чем при обработке резцами с большими передними углами.

Изменение глубины резания оказывает наименьшее влияние на характер эпюр начальных напряжений. Эпюра напряжений после строгания с глубиной резания 3,5 мм мало отличается от эпюры, полученной после строгания с $t = 1,5$ мм. Однако при очень малых глубинах резания в поверхностном слое образуются начальные напряжения сжатия, а не растяжения, как при нормальных глубинах.

Хорошие результаты в отношении уменьшения величины начальных напряжений растяжения и глубины их проникновения показали резцы с большим положительным передним углом и отрицательной фаской шириной 0,2...0,4 мм на передней грани.

Существенное влияние на начальные напряжения оказывает износ резца. По мере нарастания износа изменяется характер эпюры начальных напряжений: появляется подслоный максимум и увеличивается глубина проникновения напряжений в ПС.

Чувствительность различных сталей к образованию начальных и остаточных напряжений при лезвийной обработке в основном определяется их пределом текучести и склонностью к деформационному упрочнению. Эпюры начальных напряжений у легированных и углеродистых сталей имеют подобный характер, однако величина напряжений и глубина их распространения различны для разных марок сталей (рис. 3.2). Наибольшие начальные напряжения обнаружены после обработки стали 14X17H2, имеющей наиболее высокие механические свойства ($\sigma = 900$ МПа, $\sigma_{\max} = 1060$ МПа, НВ = 2930 МПа), наименьшие – в ПС стали 15X11МФ ($\sigma = 470$ МПа, $\sigma_{\max} = 680$ МПа, НВ = 2200 МПа). Начальные напряжения в сталях 12X13 и 20X13 имеют более низкий уровень, чем сталь 14X17H2, но распространяются в ПС на большую глубину.

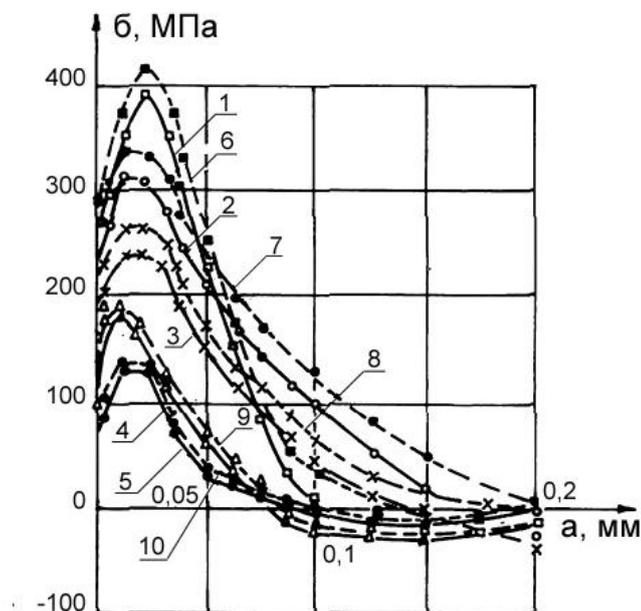


Рис. 3.2. Влияние обрабатываемого материала на остаточные (1, 2, 3, 4, 5) и начальные (6, 7, 8, 9, 10) напряжения при строгании образцов из сталей: 1 и 6 – 14X17H2; 2 и 7 – 20X13; 3 и 8 – 12X13; 4 и 9 – ст. 45; 5 и 10 – 15X11МФ

Увеличение скорости резания с 4 до 20 м/мин сопровождается не-большим снижением уровня остаточных напряжений в ПС в связи с по-вышением температуры в зоне резания.

Увеличение подачи при строгании титановых сплавов приводит к по-вышению как уровня начальных напряжений сжатия, так и глубины их проникновения в ПС. Это объясняется увеличением роли первичного де-формирования за счет роста равнодействующей силы резания на передней поверхности резца.

При лезвийной обработке титановых сплавов на начальные напряже-ния существенно влияет материал режущей части инструмента. Так, ис-пользование резцов с пластинками твердого сплава ВК8 приводит к уменьшению уровня и глубины проникновения начальных напряжений сжатия по сравнению с обработкой резцами Р14М7К25 с 0,35 до 0,2 мм. Твердый сплав ВК8 менее склонен к адгезионному и диффузионному вза-имодействию с титановыми сплавами, чем быстрорежущая сталь, что яв-ляется основной причиной уменьшения уровня возникающих при резании начальных напряжений.

Механизм формирования стружки и поверхностного слоя при фрезе-ровании имеет много общего с подобными процессами при лезвийной об-работке. Экспериментальные исследования остаточных напряжений стальных образцов после фрезерования показали, что наибольшее влияние оказывает подача. Увеличение подачи с 0,08 до 0,80 мм/зуб сопровожда-ется резким повышением толщины срезаемого слоя на участке траектории зуба фрезы, на котором происходит непосредственное образование ПС. Это приводит как к увеличению глубины проникновения начальных напряжений на стальных образцах с 0,2 до 0,28 мм, так и к росту их мак-симальных значений (со 180 до 340 МПа) [6].

С увеличением скорости резания происходит локализация пластичес-ких деформаций в тонком слое, увеличение напряжений и уменьшение глубины их залегания. Так, при встречном фрезеровании образцов из ста-ли 20Х13 увеличение скорости резания с 12 до 61 м/мин привело к росту напряжений растяжения от 120 до 310 МПа и к уменьшению глубины их залегания от 0,26 до 0,12 мм.

Значительно влияет на начальные напряжения износ фрезы. В период работы острой фрезой в ПС стальных образцов образуются большие напряжения растяжения. В процессе некоторого периода приработки происходит сглаживание микронеровностей на режущих кромках и поверхностях, снижается коэффициент трения, облегчается процесс пластической деформации в зоне резания и формирования ПС, происходит уменьшение начальных напряжений в ПС. Дальнейшее нарастание износа сопровождается увеличением радиуса округления режущей кромки и усилий со стороны задней грани зубьев фрезы.

При фрезеровании для снижения начальных напряжений более эффективно применять жидкости смазывающего действия, менее эффективно уменьшают начальные напряжения жидкости охлаждающего действия.

При сверлении резание происходит в стесненных условиях при значительных перепадах скоростей вдоль режущей кромки. Металл поверхностного слоя подвергается воздействию в основном периферийной части режущей кромки и уголка, а при глубоком сверлении сверлами одностороннего резания может дополнительно деформироваться опорными элементами сверла и эвакуируемой стружкой.

Исследования поверхностного слоя глубоких отверстий диаметром 16,3 мм из коррозионно-стойкой стали 08X18H10T показали следующее: после сверления ружейными сверлами одностороннего резания в ПС глубиной до 0,1...0,2 мм могут формироваться тангенциальные и осевые остаточные напряжения как сжатия, так и растяжения (рис. 3.3) величиной до 140...150 МПа. При работе сверлом с небольшим износом ($h < 0,25$ мм) формируются остаточные напряжения сжатия, и глубина их проникновения не превышает 0,03 мм. С увеличением износа сверла по задней грани и уголку до 0,4 мм глубина залегания остаточных напряжений в ПС увеличивается до 0,15...0,2 мм.

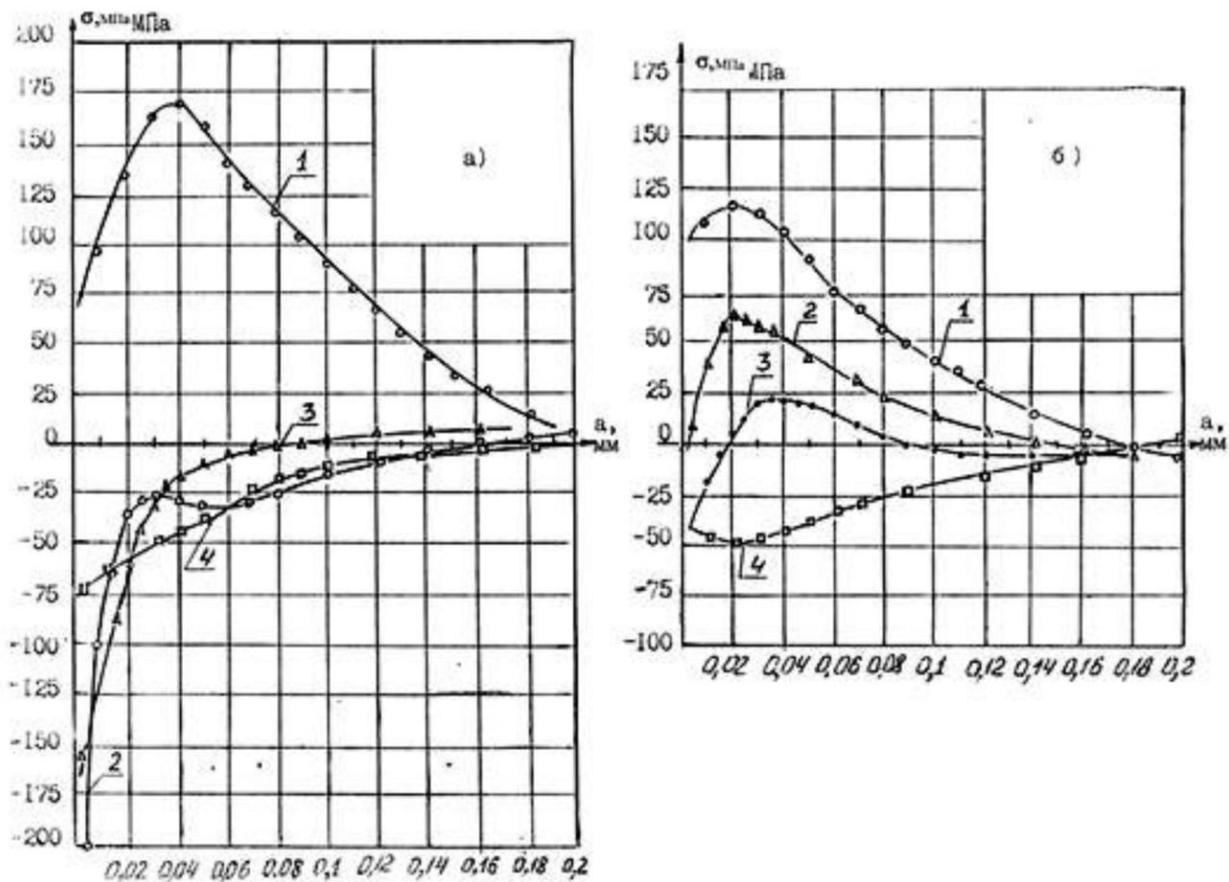


Рис. 3.3. Остаточные напряжения в поверхностном слое отверстий в коллекторе из стали 08X18H10T: а – тангенциальные; б – осевые; 1 – сверление ружейным сверлом; 2 – сверление + зенкерование; 3 – сверление + развертывание; 4 – сверление по методу БТА

Из-за нестабильного процесса в зоне резания и формирования ПС могут образовываться как остаточные напряжения сжатия, так и растяжения величиной до 40...50 МПа. Уменьшение скорости резания сопровождается снижением остаточных напряжений растяжения и переходом их в напряжения сжатия при $V = 30...40$ м/мин. Снижение подачи с 0,04 до 0,02 мм/об привело к уменьшению тангенциальных остаточных напряжений растяжения со 117 до 50 МПа.

Сверление отверстий диаметром 15,8 мм со скоростью резания 62 м/мин и подачей 0,04 мм/об с последующим зенкерованием с $V = 26$ м/мин и $S = 0,04$ мм/об сформировало в тонком ПС до 0,05 мм тангенциальные остаточные напряжения сжатия величиной до 180 МПа.

Обработка отверстий сверлами одностороннего резания типа БТА также вызвала в ПС остаточные напряжения сжатия величиной до 80 МПа

в тангенциальном направлении и до 50 МПа в осевом направлении, однако глубина их проникновения была значительной – до 0,2 мм. Уменьшение подачи с 0,05 до 0,02 мм/об существенно не повлияло на максимальные остаточные напряжения сжатия, а только на глубину их проникновения: она также уменьшилась до 0,06 мм.

Вопросы для самопроверки

1. Опишите влияние скорости резания на остаточные напряжения при точении.
2. Каково влияние обрабатываемого материала и геометрии режущего инструмента на остаточные напряжения при строгании?
3. Как распределяются остаточные напряжения в поверхностном слое отверстий при сверлении, зенкеровании, развертывании?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном конспекте лекций изложены основные показатели качества машин, а также представлены технологические методы, с помощью которых осуществляется достижение этих показателей. Основное внимание уделено способам улучшения параметров поверхностного слоя рабочих поверхностей деталей машин.

В настоящее время для улучшения параметров поверхностного слоя применяются способы термической обработки (закалка, отпуск, нормализация и др.), необходимые для повышения твердости поверхности, снятия внутренних напряжений. Для повышения износостойкости применяются различные виды химико-термической обработки, такие как азотирование, цементация, нитроцементация, цианирование и т. д.

Находят широкое применение и способы поверхностно-пластического деформирования – упрочняющее накатывание и раскатывание, дробеструйная обработка, ультразвуковое упрочнение. Данные технологии являются малооперационными, т. е. позволяют за одну операцию решить ряд технологических задач: повысить твердость поверхности, улучшить шероховатость, модифицировать поверхностный слой детали. Достаточно эффективным является метод ударно-акустической обработки, где, помимо решения вышеуказанных задач, происходит внедрение в поверхностный слой суспензии MoS₂, что позволяет значительно улучшить совместимость деталей пар трения и повысить их долговечность.

Наиболее распространенными способами повышения качества деталей машин являются оптимизации технологических решений применением рационального использования геометрии инструмента и режимов обработки. При подборе рациональных режимов обработки (скорость резания, подача, глубина резания) и оптимальных значений углов резца удается значительно снизить остаточные напряжения в поверхностном слое деталей и тем самым повысить их качество.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Блюменштейн, В. Ю. Научные основы технологии машиностроения [Электронный ресурс] : учеб. пособие для студ. направления подготовки 150900 – Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств / В. Ю. Блюменштейн. – Электрон. дан. – Кемерово : Изд-во КузГТУ, 2011. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
2. Кузнецов, Н. Д. Технологические методы повышения надежности деталей машин : справочник / Н. Д. Кузнецов, В. И. Цейтлин, В. И. Волков. – М. : Машиностроение, 1993. – 304 с.
3. Локтев, Д. А. Накатное полирование и упрочняющее накатывание / Д. А. Локтев, Е. Панченко // Стружка. – 2003. – № 9. – С. 10–15.
4. Масягин, В. Б. Производственные наукоемкие технологии / В. Б. Масягин. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2012. – 48 с.
5. Минкевич, А. Н. Химико-термическая обработка металлов и сплавов / А. Н. Минкевич. – М. : Машиностроение, 1965. – 493 с.
6. Овсеенко, А. Н. Технологическое обеспечение качества изделий машиностроения : учеб. пособие / А. Н. Овсеенко, В. И. Серебряков, М. М. Гаек. – М. : Янус-К, 2004. – 296 с.
7. Полевой, С. Н. Упрочнение машиностроительных материалов : справочник / С. Н. Полевой, В. Д. Евдокимов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1994. – 496 с.
8. Пучков, А. А. Основы технологии машиностроения : учеб. пособие для студентов специальности 1-36 01 01 «Технология машиностроения» дневной и заочной форм обучения / А. А. Пучков, А. В. Петухов. – Гомель : Изд-во Гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого, 2012. – 276 с.
9. Скобелев, С. Б. Спецтехнология : конспект лекций / С. Б. Скобелев. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2012. – 96 с.
10. Скобелев, С. В. Технологические методы повышения износостойкости деталей пар трения : монография / С. В. Скобелев, В. Ф. Ковалевский ; Минобрнауки России, ОмГТУ. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2014. – 116 с.
11. Справочник технолога-машиностроителя : в 2 т. Т. 1 / под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1986. – 656 с.

12. Телевной, А. В. Технологические процессы повышения конструкционной прочности деталей машин : учеб. пособие / А. В. Телевной, В. А. Телевной. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 1993. – 122 с.

13. Фетисов, Г. П. Материаловедение и технология металлов / Г. П. Фетисов, М. Г. Карпман. – М. : Высш. шк., 2000. – 639 с.