

Конспект лекций по дисциплине "Технологическое обеспечение качества"

Тема 1.1 Жизненный цикл изделий машиностроения. Эксплуатационные свойства деталей машин. Качество поверхности деталей и эксплуатационные свойства

Жизненный цикл изделия — это совокупность процессов, выполняемых от момента выявления потребностей общества в определенном изделии до момента удовлетворения этих потребностей и утилизации изделия.

Изделием в машиностроении называется предмет производства, подлежащий изготовлению на предприятии. Изделием может быть машина, элемент машины и даже отдельная деталь, в зависимости от того, что является продуктом конечной стадии данного производства. Например, для автомобильного завода изделием является автомобиль, для станкостроительного завода – станок, для инструментального завода – режущий или мерительный инструмент.

В соответствии с ГОСТом 2.101-68 устанавливаются следующие виды изделий:

- детали;
- сборочные единицы (узлы);
- комплексы;
- комплекты;
- агрегаты.

Деталь является изделием или составной частью изделия, изготовленной из однородного по наименованию и марке материала без применения сборочных операций. Например, валик, винт, корпус, зубчатое колесо. Деталь – это первичный сборочный элемент каждой машины. *Базовая деталь* – это деталь с базовыми поверхностями, выполняющая в сборочном соединении (узле) роль соединительного звена, обеспечивающего при сборке соответствующее относительное положение других деталей (например, корпус редуктора). Применительно к общей сборке изделий, когда основными сборочными элементами являются уже собранные сборочные соединения, одно из этих соединений, удовлетворяющее изложенному выше требованию (сформулированному для базовой детали), называется базовым сборочным соединением (базовым узлом).

Сборочной единицей (узлом) – называется изделие, составные части которого подлежат соединению на предприятии изготовителе или его структурном подразделении (цехе) сборочными операциями, такими как простое соединение деталей, соединение деталей их запрессовкой, свинчиванием, сваркой, пайкой, клеейкой, склеиванием и т.д. Например, станок, редуктор, сварной корпус, коробка скоростей, ротор турбины, шпиндельный узел.

Характерным признаком сборочной единицы с технологической точки зрения является возможность её сборки обособленно от других элементов изделия в целом (машины). Сборочная единица в зависимости от конструкции может состоять либо из отдельных деталей, либо из сборочных единиц низшего порядка.

Комплексом называется два и более специфицированных изделия, не соединенных на предприятии изготовителе сборочными операциями, но предназначенных для выполнения взаимосвязанных эксплуатационных функций, например, автоматическая линия, станок с ЧПУ с управляющими панелями. В комплекс кроме изделий,

выполняющих основные функции, могут входить детали, сборочные единицы и комплекты, предназначенные для выполнения вспомогательных функций, например детали и сборочные единицы, предназначенные для монтажа комплекса на месте его эксплуатации.

Комплект представляет собой два и более изделий, не соединенных на предприятии изготовителе сборочными операциями, и представляющие собой набор изделий, имеющих общее эксплуатационное назначение вспомогательного характера, например, комплекты запасных частей, инструментов, измерительной аппаратуры, упаковочной тары.

Агрегат – это сборочная единица, обладающая полной взаимозаменяемостью возможностью сборки отдельно от других составных частей изделия (или изделия в целом) и способностью выполнять определенную функцию в изделии или самостоятельно (например, двигатель).

Жизненный цикл машиностроительных изделий (ЖЦИ) включает ряд этапов, начиная от зарождения идеи нового изделия до его утилизации по окончании срока использования. Основные этапы жизненного цикла машиностроительного изделия представлены на рис.1.1. К ним относятся этапы *проектирования, технологической подготовки производства (ТПП), собственно производства, реализации продукции, эксплуатации, реновации* и, наконец, *утилизации* (в число этапов жизненного цикла могут также входить маркетинг, закупки материалов и комплектующих, предоставление услуг, упаковка и хранение, монтаж и ввод в эксплуатацию). Рассмотрим содержание основных этапов ЖЦИ для изделий машиностроения.

На этапе проектирования выполняются проектные процедуры — формирование принципиального решения, разработка геометрических моделей и чертежей, расчеты, моделирование процессов, оптимизация и т.п.

На этапе подготовки производства разрабатываются маршрутная и операционная технологии изготовления деталей, реализуемые в программах для станков ЧПУ; технология сборки и монтажа изделий; технология контроля и испытаний.

На этапе производства осуществляется календарное и оперативное планирование; приобретение материалов и комплектующих с их входным контролем; механообработка и другие требуемые виды обработки; контроль результатов обработки; сборка; испытания и итоговый контроль.

На постпроизводственных этапах выполняются консервация, упаковка, транспортировка; монтаж у потребителя; эксплуатация, обслуживание, ремонт и восстановление; утилизация.

На всех этапах жизненного цикла имеются свои целевые установки. При этом участники жизненного цикла стремятся достичь поставленных целей с максимальной эффективностью. На этапах проектирования, ТПП и производства нужно обеспечить выполнение требований, предъявляемых к производимому изделию, при заданной степени надежности изделия и минимизации материальных и временных затрат, что необходимо для достижения успеха в конкурентной борьбе в условиях рыночной экономики. Понятие эффективности охватывает не только снижение себестоимости продукции и сокращение сроков проектирования и производства, но и обеспечение удобства освоения и снижения затрат на будущую эксплуатацию изделий. Особую важность требования удобства эксплуатации имеют для сложной техники, например, в таких отраслях, как авиа- или автомобилестроение.

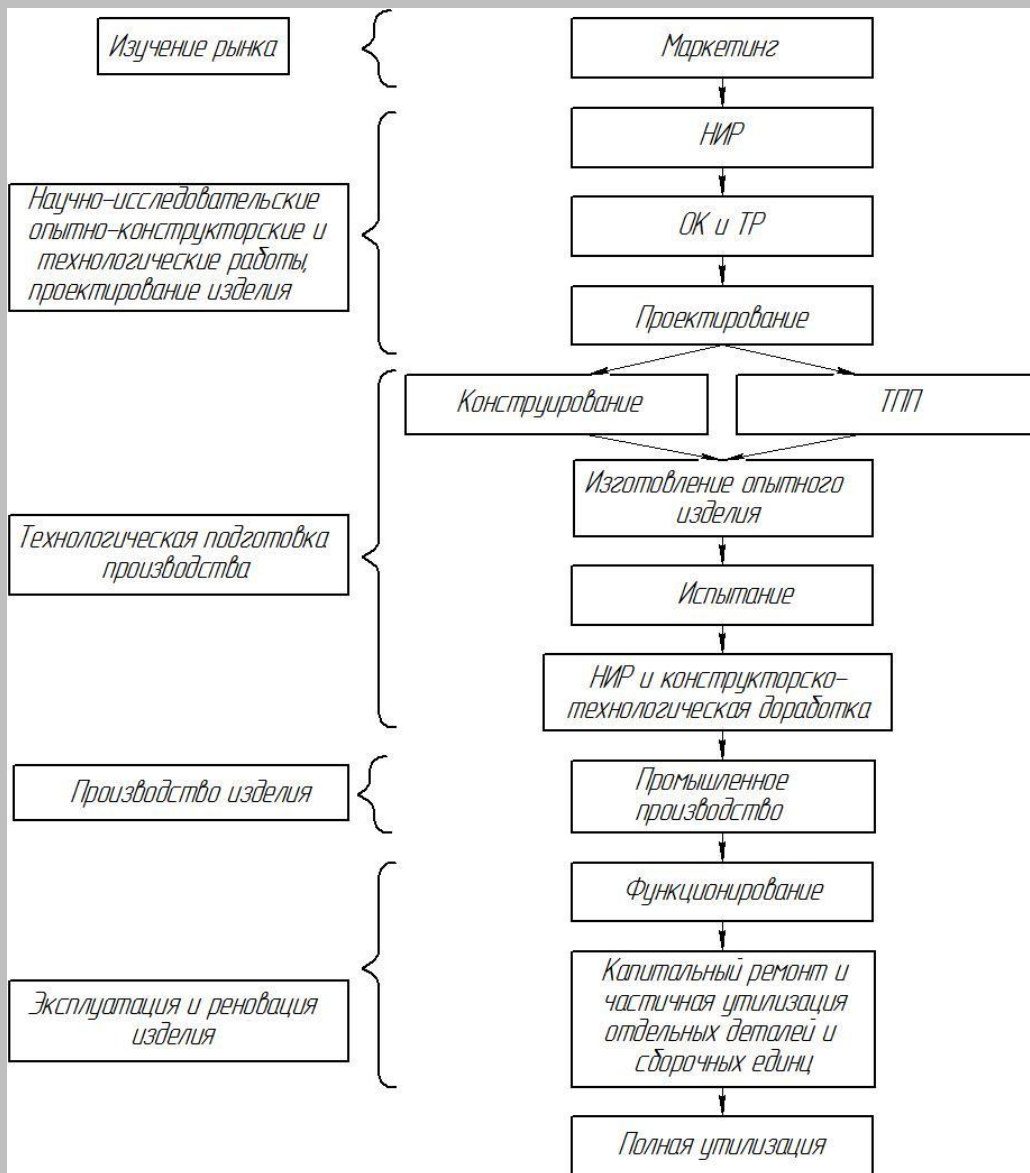


Рис.1.1. Жизненный цикл машиностроительного изделия

Значительное место в жизненном цикле изделия, а именно его становлении, принадлежит технологии машиностроения, которая как представлено на рис 1.2 включает в себя производство заготовок, изготовление деталей, сборку, контроль и испытание готовых изделий, а также их ремонт и восстановление в процессе эксплуатации.

Причем, чем раньше в этом цикле будут задействованы технологии, тем выше эффективность и конкурентоспособность изделий машиностроения. Еще на предварительной стадии маркетинга и проработки технологии могут оценить конкурентоспособность технологического процесса, для которого предполагается выпуск изделия. Проведение НИР и опытно-конструкторских работ без учета технологических аспектов практически неэффективно, так как себестоимость, а следовательно и конкурентоспособность изделий определяются их технологической себестоимостью. Поэтому на ранних стадиях проектирования изделий должна проводиться тщательная проработка их технологичности.

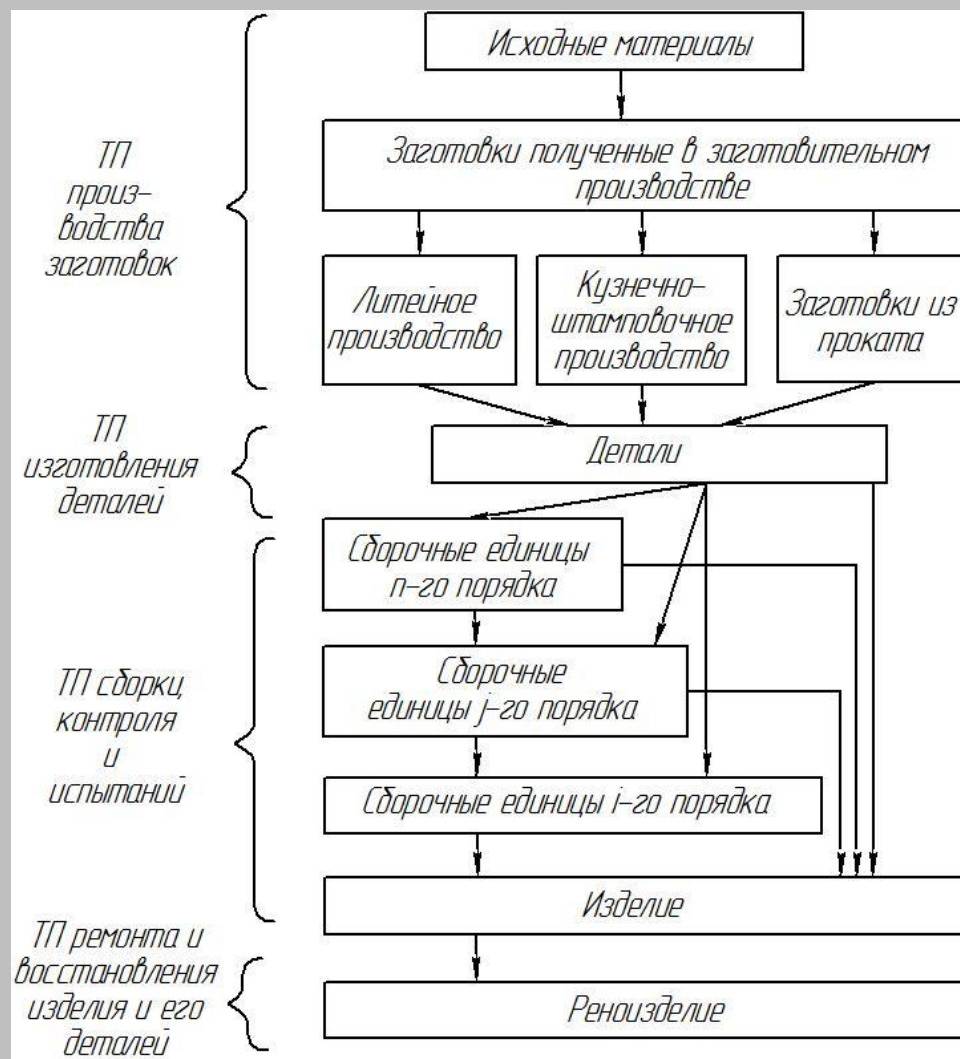


Рис. 1.2. Технологическая структура машиностроительных изделий

Под *технологичностью конструкции изделий* понимается гарантированная собираемость, обеспечивающая его работоспособность, при достижении необходимой при этом точности входящих в него деталей технически и экономически обоснованными методами

Техническая подготовка производства включает в себя:

- конструкторскую подготовку производства - разработку конструкции изделия и создание его сборочных чертежей, рабочих чертежей деталей, запускаемых в производство, с оформлением соответствующих спецификаций и другой конструкторской документации;

- технологическую подготовку производства (ТПП) - совокупность мероприятий, обеспечивающих технологическую готовность производства, которая определяется наличием на предприятии полных комплектов конструкторской и технологической документации и средств технологического оснащения, необходимых для выпуска изделий с установленными технико-экономическими показателями в заданном объеме;

- календарное планирование производственного процесса изготовления изделий в установленные сроки при заданных объеме выпуска и затратах;

Основными задачами ТПП являются:

1. Обеспечение технологичности конструкций изделия.

2. Выбор и подготовка заготовок;
3. Разработка технологических процессов;
4. Проектирование средств технологического оснащения;
5. Контроль и управление технологическим процессом.

Эксплуатационные свойства поверхностей деталей машин.

На каждую деталь в машине или сборочной единице возлагается исполнение определённых функций, вытекающих из общего функционального назначения машины или сборочной единицы. Безотказность и долговечность исполнения своих функций изделием машиностроения определяется рядом эксплуатационных свойств деталей и их соединений.

Под *эксплуатационными свойствами* деталей машин понимается способность деталей машин сопротивляться условиям внешнего физико-механохимического воздействия на них.

В зависимости от условий внешнего воздействия (трение, статические или динамические нагрузки, химически активные среды и др.) должны быть сформированы следующие эксплуатационные свойства поверхностей деталей машин и их соединений: контактная жёсткость, износостойкость, коррозионная стойкость, статическая и динамическая поверхностная контактная прочность. Все эти эксплуатационные свойства в значительной мере зависят от качества поверхностного слоя деталей, так как практически все разрушения (статические, усталостные, контактные, коррозионные и др.) начинаются с поверхности.

Контактная жёсткость. Контактная жесткость определяет способность поверхностных слоёв деталей, находящихся в контакте, сопротивляться действию сил стремящихся их деформировать:

$$j = \frac{P}{y_k}, \quad (1.1)$$

где P – сила на площади контакта; y_k - контактные перемещения.

Контактная жёсткость составляет значительную часть в балансе упругих перемещений машин и сборочных единиц (Рис. 1.3). Контактная жёсткость сказывается на точности работы машин и приборов, на точности обработки на металлорежущих станках и т.д., т.е. на качестве машиностроительных изделий.

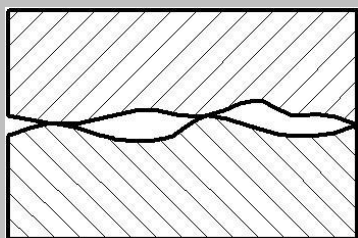


Рис. 1.3. Схема контакта двух твердых тел (деталей).

Износостойкость поверхности. Работа машин во многом обусловлена таким физическим феноменом, как трение, которое проявляется в сопротивлении движению тел. Основные понятия, связанные с трением и сопутствующими ему явлениями определены в государственном стандарте (ГОСТ 23002-78).

Трение (внешнее трение) – сопротивление относительно перемещению, возникающее между двумя телами в зоне соприкосновения поверхностей по касательной к ним и сопровождаемое рассеянием энергии.

Трение не является однозначно вредным или полезным. Это зависит от обстоятельств его возникновения и применения. Трение в механизмах чаще принято относить к вредным сопротивлениям из-за создаваемых им механических потерь, нагрева и износа деталей. Однако всем очевидна и огромная польза трения, например, при торможении машин, гашении опасной вибрации или прогулках по гололёду, особенно в горах.

В процессе эксплуатации механизма, машины или прибора неизбежно происходит изнашивание элементов его кинематических пар – разрушение и отделение материала с поверхности с постепенным изменением размеров и формы. Это снижает прочность деталей и точность механизма, кроме того, повышаются нагрузки, растёт вибрация и шум вследствие зазоров в кинематических парах. В дальнейшем изнашивание может привести к поломке деталей и выходу машины из строя. Количественной оценкой результата изнашивания является *износ*, определяемый в установленных единицах.

Износ – результат *изнашивания*, выраженный в единицах длины, объёма или массы. Допустимый износ не нарушает работоспособность детали. Предельный износ соответствует предельному состоянию изделия, когда дальнейшая его эксплуатация невозможна. При трении со смазочным материалом, когда его толщина между деталями больше высоты неровностей – износ очень незначителен.

Одним из важнейших эксплуатационных свойств деталей машин является износостойкость. Под *износостойкостью* понимают способность поверхностных слоёв деталей сопротивляться разрушению при действии сил трения. Кривая износа имеет три явно выраженных участка (Рис. 1.4): I - начальный участок кривой характеризующий процесс приработки нового сопряжения, II - участок кривой, характеризующийся небольшой и относительно постоянной по величине скоростью износа, отвечающей периоду нормальной работы сопряжения - участок нормального износа или естественный износ, III - участок катастрофического износа, то есть участок, на котором скорость износа резко возрастает.



Рис. 1.4 Кривая износа.

Приблизительно сопротивление изнашиванию (износостойкость) оценивают, в частности, сопоставлением расчетных давлений с допускаемыми значениями, установленными на основе опыта эксплуатации конструкции. Инженерные расчёты по

износу кинематических пар выполняют по интегральным характеристикам: скорости и интенсивности изнашивания.

Скорость изнашивания – отношение износа ко времени, за которое он возник

$$\gamma_h = dI_h/dt = \Delta I_h/\Delta t \text{ (мкм/ч)}. \quad (1.2)$$

Интенсивность изнашивания – отношение износа к пробегу, наработке или объёму выполненной работы. Различают износ линейный I_h , массовый I_m и объёмный I_v . Отношение износа к пути трения L_T , на котором произошёл этот износ, характеризует *интенсивность изнашивания*, соответственно:

- линейную $I_h = I_h/L_T$ (мкм/км);
- массовую $I_m = I_m/L_T$ (г/км);
- объёмную $I_v = I_v/L_T$ (мм³/км).

Линейная интенсивность изнашивания изменяется в широких пределах $10^{-3} \dots 10^{-13}$. Конкретные значения для разных условий получают экспериментально.

Отношение объёма изношенного материала к работе сил трения F_T называют *энергетической интенсивностью изнашивания*.

Износ охватывает около 80% деталей. В зависимости от характера происходящих процессов различают следующие виды изнашивания:

- *механическое* – результат механического взаимодействия;
- *абразивное* – результат режущего и царапающего действия твёрдых частиц, находящихся в зоне контакта деталей (на рабочей поверхности наблюдаются царапины, канавки, полосы);
- *эрозионное* – результат воздействия потоков жидкости и газа;
- *гидроэрозионное (газоэрозионное)* – результат воздействия жидкости (газа);
- *гидроабразивное (газоабразивное)* – результат воздействию твёрдых частиц, взвешенных в жидкости (газе);
- *коррозионно-механическое* – механический контакт в сочетании с химическим и/или электрическим взаимодействием материала со средой (на рабочей поверхности наблюдаются плёнки, частицы, продукты реакций);
- *усталостное* – результат усталостного разрушения при повторном деформировании микрообъёмов материала, наблюдается как при трении скольжения, так и при трении качения (на рабочей поверхности наблюдаются трещины, выкрашивание);
- *кавитационное* – гидроэрозионное при движении тела в жидкости, когда пузырьки газа захлопываются вблизи поверхности с местным повышением давления и температуры;
- *изнашивание при заедании* – преимущественно наблюдается при высоких скоростях и давлениях с выдавливанием разъедающей трущиеся поверхности масляной пленки. В результате тепло не успевает отводиться, и происходит схватывание (сварка) частиц металла контактирующих поверхностей с дальнейшим отрывом их от более мягкой поверхности и прочным соединением с более твердой. Образовавшиеся неровности царапают рабочие поверхности деталей с более мягкой поверхностью, что приводит к выходу их из строя (на рабочей поверхности наблюдаются чешуйки, выступы, выкрашивание);
- *окислительное* – аналогично *коррозионно-механическому*, но под основным влиянием химических реакций с кислородом или окисляющей средой;

- *фреттинг* – при малых относительных колебательных движениях контактирующих поверхностей;
- *электроэрозионное* – в результате воздействия разрядов при прохождении электрического тока.

В обычных условиях сочетаются разные виды изнашивания, что очень затрудняет анализ условий работы машин.

Коррозионная стойкость. Под *коррозионной стойкостью* понимают способность поверхностных слоёв сопротивляться разрушающему действию внешней среды. *Коррозия металлов* - разрушение металлов вследствие физико-химического воздействия внешней среды, при этом металл переходит в окисленное (ионное) состояние и теряет присущие ему свойства.

Особое место в комплексе мероприятий по обеспечению бесперебойной эксплуатации оборудования отводится надежной защите его от коррозии. Необходимость осуществления мероприятий по защите от коррозии диктуется тем обстоятельством, что потери от коррозии приносят чрезвычайно большой ущерб. По имеющимся данным, примерно около 10% ежегодной добычи металла расходуется на покрытие безвозвратных потерь вследствие коррозии и последующего распыления. Основной ущерб от коррозии металла связан не только с потерей больших количеств металла, но и с порчей или выходом из строя самих металлических конструкций, т.к. вследствие коррозии они теряют необходимую прочность, пластичность, герметичность, тепло- и электропроводность, отражательную способность и другие необходимые качества. К потерям должны быть отнесены также громадные затраты на всякого рода защитные антикоррозионные мероприятия, ущерб от ухудшения качества выпускаемой продукции, выход из строя оборудования, аварий в производстве и др.

Усталостная прочность. Многие детали машин и механизмов, а также конструкции сооружений в процессе эксплуатации подвергаются циклически изменяющимся во времени воздействиям. Если уровень напряжений, вызванный этими воздействиями, превышает определенный предел, то в материале формируются необратимые процессы накопления повреждений, которые в конечном итоге приводят к разрушению системы.

Процесс постепенного накопления повреждений в материале под действием переменных напряжений, приводящих к разрушению, называется *усталостью*. У детали повреждения в процессе усталости накапливаются и являются необратимыми. Свойство материала противостоять усталости называется *выносливостью*, то есть усталостная объёмная прочность характеризуется сопротивлением усталости или выносливостью. Под сопротивлением усталости деталей машин понимают их способность сопротивляться разрушению при действии знакопеременных нагрузок. Разрушение материала при знакопеременных нагрузках начинается в основном с поверхности детали, потому его качество, зачастую, является решающим в обеспечении этого эксплуатационного показателя.

На рис. 1.5 представлен внешний вид усталостного излома. На фотографии (рис.1.5 а) видно, что разрушение бруса произошло в результате развития усталостной трещины, образовавшейся у края сечения. Разрушение рельса (рис.1.5 б) обусловлено развитием усталостной трещины, образовавшейся внутри сечения в зоне местного дефекта.



Рис. 1.5. Усталостный излом: а - круглый брус, б - рельс.

Для большинства черных металлов можно указать такое наибольшее максимальное напряжение, при котором материал не разрушается при любом числе циклов. Такое напряжение называется *пределом усталости*, или *пределом выносливости* σ_r , где индекс r соответствует коэффициенту цикла. Так, для симметричного цикла обозначение предела выносливости принимает вид σ_{-1} , для пульсирующего σ_0 или $\sigma_{\pm\infty}$ и т. д. Для цветных металлов и для закаленных до высокой твердости сталей не удастся установить такое число циклов, выдержав которое, образец не разрушился бы в дальнейшем. Поэтому в подобных случаях вводится понятие условного предела выносливости. За условный предел выносливости принимается напряжение, при котором образец способен выдержать 10^8 циклов.

Предел усталости не является характеристикой только свойств материала, как, например, модуль упругости или коэффициент Пуассона. Он зависит также от метода ведения испытаний. Расчетное напряжение для образца не определяет полностью процесс усталостного разрушения. В результате образования трещины величина напряжений и законы их распределения в образце непрерывно меняются в зависимости от условий дальнейшего развития трещины. Последние же в свою очередь зависят от абсолютных размеров образца и характера приложения внешних сил. Все это неминуемо сказывается на предельном числе циклов и на величине предела усталости. Например, предел усталости, полученный в условиях циклического растяжения и сжатия, оказывается на 10—20% ниже, чем предел усталости, полученный при изгибе. Предел усталости при кручении сплошных образцов отличается от предела усталости, полученного для полых образцов, и т. п.

Статическая и динамическая поверхностная контактная прочность. Под *статической контактной прочностью* понимается способность поверхностных слоёв сопротивляться разрушению при статическом контактом взаимодействии с твёрдым телом. Статические контактные разрушения наступают при превышении контактных давлений величины допускаемых контактных напряжений. Под *динамической контактной прочностью* понимается способность поверхностных слоёв сопротивляться разрушению при динамическом контактом взаимодействии с твёрдым телом. Динамичность нагружения характеризуется либо скоростью удара V , либо скоростью деформации ϵ , либо скоростью изменения напряжения σ , которая зависит от скорости приложения нагрузки. Контактывание твёрдых тел при динамических нагрузках в

значительной мере определяется пластическими контактными деформациями, зависящими как от начальной скорости соударения V_0 , так и от физико-механических свойств поверхностного слоя, которые подвергаются технологическому управлению.

Понятие качества поверхности детали.

Под качеством поверхности понимают состояние поверхностного слоя материала детали. Поверхностный слой включает в себя наружную поверхность, которая контактирует с окружающей средой, и нижележащий слой материала с измененными по сравнению с основной частью (сердцевинной) строением и свойствами (механическими, физическими, химическими). Качество поверхности характеризуется и количественно оценивается в двух направлениях:

- В геометрическом – шероховатостью поверхности, которая представляет собой совокупность неровностей поверхности с относительно малыми шагами. Шероховатость увеличивает площадь наружной поверхности и поэтому усиливает эффекты явлений, имеющих место на границе с окружающей средой. Шероховатость оценивается набором показателей, оговоренных специальным стандартом.
- В физико-механическом – описанием и оценкой измененных в результате обработки свойств материала в поверхностном слое. Сюда входят оценки изменений химического состава, микроструктуры и фазового состава, механических свойств, напряженного состояния и т.д.

Состояние поверхностей существенно влияет на качество детали, повышая или понижая ее эксплуатационные свойства. Поэтому в технологии машиностроения сформировалось особое направление исследований, направленных на изучение, во-первых, процесса формирования показателей качества поверхности и, во-вторых, влияния этих показателей качества поверхности на различные эксплуатационные свойства детали. Большой вклад в разработку этой проблемы внесли советские и российские ученые Н.Н. Давиденков, П.Е. Дьяченко, А.М. Сулима, А.А. Маталин, П.И. Ящерицын, Э.В. Рыжов, А.Г. Суслов, В.Ф. Безъязычный, А.П. Бабичев и многие другие. Их усилиями сформировалось учение о качестве поверхности, описывающее как механизм формирования поверхностного слоя при обработке деталей различными методами, так и возможности повышения эксплуатационных свойств деталей путем целенаправленного формирования различных показателей качества поверхности.

Реальная наружная поверхность детали, которая отделяет ее от окружающей среды, образуется в процессе обработки и отличается от номинальной, изображаемой на чертеже, наличием различных по форме и высоте неровностей в виде выступов и впадин с небольшими расстояниями между ними. В результате площадь реальной наружной поверхности значительно больше, чем номинальной. На этой поверхности расположены атомы металла, которые имеют связи только с соседними и нижележащими атомами и поэтому находятся в неустойчивом, неуравновешенном состоянии. В результате граничный слой обладает запасом свободной поверхностной энергии.

Вследствие своей повышенной активности наружная поверхность любого твердого тела адсорбирует из окружающей среды различные элементы и, как правило, бывает покрыта слоями адсорбированных газов, паров воды, жиров и т.д. Адсорбция снижает поверхностное натяжение и энергию поверхностных атомов, что облегчает развитие деформации. На наружной поверхности образуются и проникают вглубь материала

различные химические соединения, наиболее типичные из них – различные окислы. Так, в поверхностном слое стали можно обнаружить последовательные слои в направлении наружной поверхности в тело детали следующих окислов железа: Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , $\text{FeO}+\text{Fe}_3\text{O}_4$, FeO . Таким образом, чем более шероховата поверхность, тем больше площадь ее контакта с окружающей средой и тем шире ворота, через которые внутрь материала проникают чужеродные атомы, изменяющие свойства материала в поверхностном слое. Эта особенность граничной поверхности может играть как положительную, так и отрицательную роль. Например, она способствует интенсификации процессов химической и химико-термической обработки, таких как цементация, фосфатирование и т.д. Но при работе детали в агрессивных средах эта же особенность интенсифицирует коррозию металлов и сплавов, что конечно же снижает эксплуатационные возможности детали.

По механизму коррозионного процесса различают два основных типа коррозии: *химическую и электрохимическую*.

Под *химической коррозией* подразумевают взаимодействие металлической поверхности с окружающей средой, не сопровождающееся возникновением электрохимических (электродных) процессов на границе фаз. Механизм химической коррозии сводится к реактивной диффузии атомов или ионов металла сквозь постепенно утолщающуюся пленку продуктов коррозии (например окислы) и встречной диффузии атомов или ионов кислорода. По современным воззрениям этот процесс имеет ионно-электронный механизм, аналогичный процессам электропроводности в ионных кристаллах. Примером химической коррозии является взаимодействие металла с жидкими неэлектролитами или сухими газами в условиях, когда влага на поверхности металла не конденсируется, а также воздействие на металл жидких металлических расплавов. Практически наиболее важным видом химической коррозии является взаимодействие металла при высоких температурах с кислородом и др. газообразными активными средами (H_2S , SO_2 , галогены, водяные пары, CO и др.). Подобные процессы химической коррозии металлов при повышенных температурах носят также название газовой коррозии. Многие ответственные детали инженерных конструкций сильно разрушаются от газовой коррозии (лопатки газовых турбин, сопла ракетных двигателей, элементы электронагревателей, колосники, арматура печей и т.д.). Большие потери от газовой коррозии (угар металла) несет металлургическая промышленность. Стойкость против газовой коррозии повышается при введении в состав сплава различных добавок (хрома, алюминия, кремния и др.). Добавки алюминия, бериллия и магния к меди повышают ее сопротивление газовой коррозии в окислительных средах. Для защиты железных и стальных изделий от газовой коррозии поверхность изделия покрывают алюминием (алитирование).

Под *электрохимической коррозией* подразумевают процессы взаимодействия металлов с электролитами (в виде водных растворов, реже с неводными электролитами, например с некоторыми органическими электропроводными соединениями или безводными расплавами солей при повышенных температурах). Процессы электрохимической коррозии протекают по законам электрохимической кинетики.

Различают коррозию с водородной, кислородной или окислительной деполаризацией.

Различают следующие типы коррозионных разрушений. При равномерном распределении коррозионных разрушений по всей поверхности металла коррозию называют *равномерной*. Если же значительная часть поверхности металла свободна от коррозии и последняя сосредоточена на отдельных участках, то ее называют *местной*.

Коррозионное растрескивание возникает при одновременном воздействии на металл агрессивной среды и механических напряжений. В металле появляются трещины транскристаллитного характера, которые часто приводят к полному разрушению изделий.

Межкристаллитная коррозия и коррозионное растрескивание наиболее опасны для конструкций, несущих механические нагрузки (мосты, тросы, рессоры, оси, автоклавы, паровые котлы и т.д.)

Электрохимическая коррозия может происходить в различных средах. Различают следующие типы электрохимической коррозии, имеющие наиболее важное практическое значение:

1. *Коррозия в электролитах.* К этому типу относятся коррозия в природных водах (морской и пресной), а также различные виды коррозии в жидких средах. В зависимости от характера среды различают: а) *кислотную* коррозию; б) *щелочную* коррозию; в) *солевую* коррозию.

2. *Почвенная (грунтовая, подземная) коррозия* - воздействие на металл грунта, который в коррозионном отношении должен рассматриваться как своеобразный электролит.

3. *Атмосферная коррозия* - коррозия металлов в условиях атмосферы, а также любого влажного газа; наблюдается под конденсационными видимыми слоями влаги на поверхности металла (мокрая атмосферная коррозия) или под тончайшими невидимыми адсорбционными слоями влаги (влажная атмосферная коррозия).

4. *Коррозия в условиях механического воздействия.* Этому типу разрушения подвергаются многочисленные инженерные сооружения, работающие как в жидких электролитах, так и в атмосферных и подземных условиях. Наиболее типичными видами подобного разрушения являются:

а) *Коррозионное растрескивание*; при этом характерно образование трещин, которые могут распространяться не только межкристаллитно, но также и транскристалльно. Примером подобного разрушения является щелочная хрупкость котлов, сезонное растрескивание латуней, а также растрескивание некоторых конструкционных высокопрочных сплавов.

б) *Коррозионная усталость*, вызываемая воздействием коррозионной среды и знакопеременных или пульсирующих механических напряжений. Этот вид разрушения также характерен образованием меж- и транскристаллитных трещин. Разрушения металлов от коррозионной усталости встречаются при эксплуатации различных инженерных конструкций (валов гребных винтов, рессор автомобилей, канатов, штанг глубинных насосов, охлаждаемых валков прокатных станов и др.).

в) *Коррозионная кавитация*, являющаяся обычно следствием энергичного механического воздействия коррозионной среды на поверхность металла. Подобное коррозионно-механическое воздействие может приводить к весьма сильным местным разрушениям металлических конструкций (например для гребных винтов морских судов). Механизм разрушения от коррозионной кавитации близок к разрушению от поверхностной коррозионной усталости.

г) *Коррозионная эрозия*, вызываемая механическим истирающим воздействием другого твердого тела при наличии коррозионной среды или непосредственным истирающим действием самой коррозионной среды. Это явление иногда называют также коррозионным истиранием или фреттинг-коррозией.

Поверхность металла обладает повышенной химической активностью и в реальных условиях неизбежно адсорбирует атомы элементов окружающей среды, покрываясь слоями адсорбированных газов, паров воды и жиров. Слой жира достигает нескольких сот микрон, пленка водяных паров составляет 50—100 слоев молекул. Жировые пленки прочно связаны с поверхностью металла и полностью не удаляются обычными механическими и химическими средствами. Воздействие внешней среды приводит к образованию на поверхности металла различных соединений, прежде всего различных окислов. Они быстро возникают в результате влияния атмосферного кислорода. Толщина наружной пленки в окисляющихся металлах равна примерно 20—100 Å (10—20 слоев молекул). Например, окисная пленка в стали равна 10—20 Å, а алюминии — 100—150 Å.

В результате диффузии в поверхностном слое могут возникнуть химические и иные соединения основного материала с проникающими извне веществами. Диффузионная подвижность атомов может привести к перераспределению концентрации легирующих элементов, способствуя этим в отдельных случаях обеднению поверхностного слоя некоторыми легирующими элементами (обезуглероживание поверхностных слоев в сталях и обеднение поверхностного слоя хрома и алюминия в жаропрочных никелевых сплавах при высоких температурах и др.).

Значительное влияние на физико-химическую активность отдельных поверхностных зерен оказывает величина их остаточных напряжений (микронапряжения), степень пластической деформации и др. Исследованиями академика П. А. Ребиндера и его учеников установлено значительное влияние на прочность металлов расклинивающего действия адсорбированных пленок жидкостей в поверхностных трещинах металлов (эффект Ребиндера). Молекулы некоторых адсорбированных веществ, распространяясь по поверхности, попадают в микротрещины, в глубине которых производят сильное расклинивающее действие, равноценное действию дополнительно приложенного к телу растягивающего усилия. Следствием такого дополнительного воздействия на металл является снижение его прочности, облегчение деформации. Чем щель уже, тем сильнее расклинивающее действие адсорбированных пленок (ширина щели не более 0,1 мкм).

Адсорбционные эффекты в процессах деформации и разрушения металлов могут быть особенно велики. Эффект адсорбционного понижения прочности особенно заметен в условиях действия знакопеременных нагрузок. При циклическом нагружении происходит расклинивание поверхностных микрощелей. При этом адсорбированные слои выдавливаются из микрощелей, но не полностью; оставшееся адсорбирующее вещество мешает полному смыканию микротрещины. Последовательное раскрытие и смыкание приводит к росту трещин и к разрыхлению поверхностного слоя. Сопротивление усталости металла в поверхностно-активных средах резко снижается (адсорбционная усталость).

Шероховатость поверхности оценивается по ее профилю, который образуется в сечении этой поверхности плоскостью, перпендикулярной к номинальной поверхности. Профиль рассматривается на длине базовой линии, которая используется для выделения неровностей и количественного определения их параметров.

Параметры количественной оценки шероховатости и способы их определения стандартизированы ГОСТ 2789–73 (в измененной редакции 1980г.) и более подробно будут рассмотрены ниже.

Также свойства поверхности и поверхностного слоя определяются микроструктурой, микротвердостью поверхности и поверхностного слоя и

распределением остаточных напряжений в поверхностном слое. Эти характеристики определяют износостойкость поверхности, ее усталостную прочность, коррозионную стойкость и т.д. Поверхности оказывают сильное влияние на многие механические, электрические и оптические свойства твердого тела поскольку на них происходит скачкообразное изменение плотности материала, кристаллической структуры или локальной ориентации кристаллитов.

1.2 Изменение качества поверхностного слоя деталей при эксплуатации

В процессе работы детали происходит адаптация поверхности детали к условиям эксплуатации. Степень адаптации и изменяющиеся характеристики поверхности зависят от условий эксплуатации, характера и величины действующих нагрузок. В процессе работы могут изменяться шероховатость, микротвердость и микроструктура поверхности, а также остаточные напряжения на поверхности в поверхностном слое. Причем изменяются практически все характеристики поверхности, но в различной степени.

Так при работе детали в условиях трения скольжения или трения качения со смазкой или без смазки в первую очередь изменяется шероховатость поверхности.

Трение (внешнее трение) – сопротивление относительному перемещению, возникающее между двумя телами в зоне соприкосновения поверхностей по касательной к ним и сопровождаемое рассеянием энергии. *Сила трения* количественно характеризует трение контактирующих тел. Сила трения, как и всякая сила – вектор и при движении направлена противоположно скорости, тангенциально к общей границе. По характеру относительного движения различают трение покоя (до перехода к относительному движению) и трение движения – скольжения или качения (рис. 1.7). При трении скольжения скорости тел в точке касания различны, а при трении качения – одинаковы.

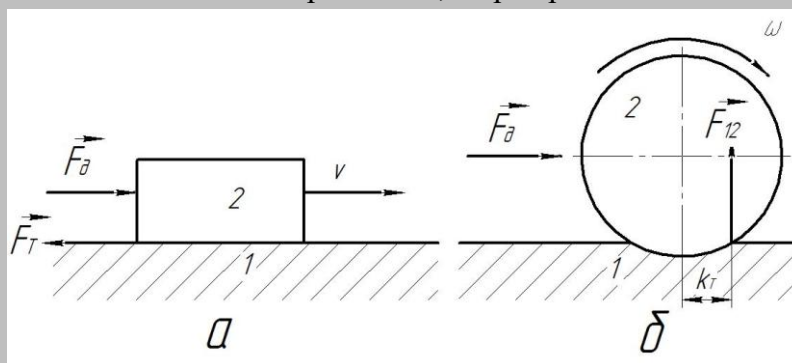


Рис. 1.7. Силы трения: а – скольжения, б – качения

Различают трение внешнее (между телами) и внутреннее (между частицами твёрдых тел, а также в газах и жидкостях). Силы внешнего трения сильно зависят от шероховатости контактирующих поверхностей (рис. 1.8, а).

Силы трения сильно отличаются при отсутствии или наличии между телами смазочного материала – либо вязкой жидкости, предварительно помещённой между телами, либо газа, подаваемого в зону контакта под давлением. *Смазочный материал* производит смазку – действие, состоящее в уменьшении силы трения и износа за счёт разделения поверхностей трения. Смазочный материал разделяет контактирующие поверхности (рис. 1.8, б).

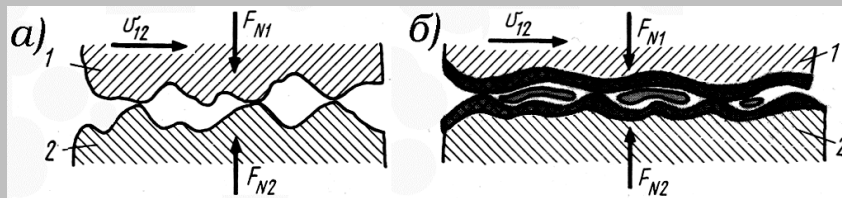


Рис.1.8. Виды трения: *а* – сухое, *б* – со смазкой

Если поверхности разделены смазочным материалом полностью, то силу трения вычисляют по формуле Ньютона. Такое трение называют вязким или жидкостным.

$$F_T = \mu A v / h, \quad (1.3)$$

где μ – динамическая вязкость смазочного материала; A – площадь поверхности скольжения; v – относительная скорость скольжения тел; h – толщина слоя смазочного материала.

Силу сухого трения скольжения находят по закону Амонтона-Кулона:

$$F_T = f \cdot F_N, \quad (1.4)$$

где f – коэффициент трения, F_N – сила нормального давления.

Трение качения, хотя и существенно ниже, но всё же существует, потому, что реальные тела не абсолютно твёрдые, а деформируются и возникает не точка, а площадка контакта (рис. 1.7,б). В этой площадке – зоне контакта возникает реактивный момент, препятствующий качению. Для качения катка нужна движущая сила F_ϕ . Точка приложения реакции F_{I2} смещена вперёд, в сторону качения на расстояние k_T , которую и называют коэффициентом трения качения. Величина коэффициента трения качения фактически характеризует деформируемость колеса и опорной поверхности. Нетрудно догадаться, что этот коэффициент имеет размерность длины. Из уравнения равновесия моментов всех сил относительно "точки контакта" B следует, что

$$F_\phi \cdot R = F_{I2} \cdot k_T, \quad (1.5)$$

а момент сил трения качения

$$M_T = F_{I2} \cdot k_T. \quad (1.6)$$

Помимо трения в контакте поверхностей, существует ещё и трение в материале деталей, обусловленное контактом частиц и молекул материала. При этом также расходуется работа внешних сил и выделяется теплота.

У конструкционных металлов внутреннее трение очень мало и при расчёте металлических деталей его не учитывают. Однако у высокомолекулярных материалов (резины, пластмасс) внутреннее трение почти на два порядка выше, поэтому оно должно учитываться при их расчёте. Внутреннее трение в материале деталей используется, в основном, для снижения шумов и вибрации путём замены металлических деталей пластмассовыми и композитными, где велико трение между частицами структуры материала.

При трении и изнашивании наблюдаются следующие явления:

- *схватывание* – местное соединение твёрдых тел под действием молекулярных сил;
- *выкрашивание* – отделение частиц материала при усталостном изнашивании с образованием ямок на поверхности трения (особенно часто у высших кинематических пар);

- *заедание* – результат схватывания, глубинного вырывания материала, переноса его с одной детали на другую;
- *приработка* – изменение геометрии и свойств поверхностей в начальный период, при постоянных внешних условиях с уменьшением силы трения, температуры и интенсивности изнашивания.

При скольжении перед микронеровностью возникает лобовой валик деформируемого материала (рис.1.9), который находится под воздействием сжимающих напряжений. За микронеровностью вследствие сил трения материал растягивается. Следовательно, материал микронеровностей испытывает знакопеременное нагружение, которое приводит к отделению частиц материала.

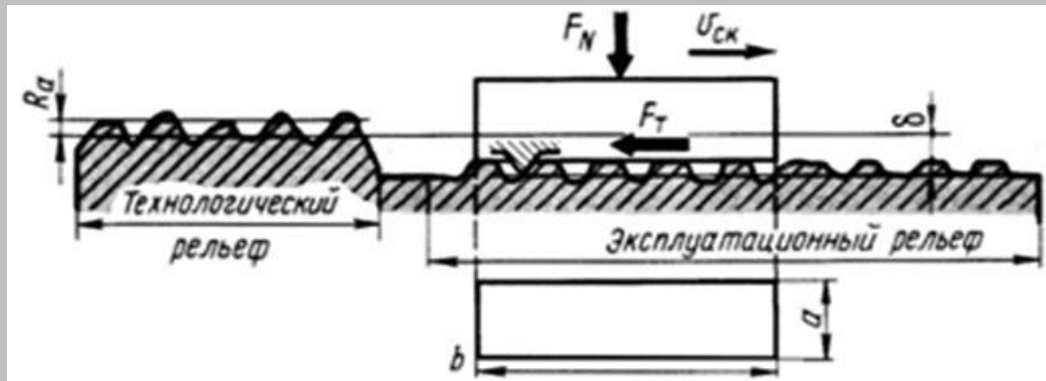


Рис. 1.9. Физическая модель изнашивания поверхности

Материал разрушается не сразу, а после некоторого числа циклов работы $n_{ц}$.

На первой стадии исходный технологический микрорельеф, полученный при изготовлении (высота неровностей обычно до 100...200 мкм), превращается в некий рельеф с меньшей шероховатостью (0,05...0,1 мкм), которая в дальнейшем, на второй стадии существенно не меняется. Для уменьшения времени приработки следует назначать при изготовлении детали такой вид обработки поверхности, которая ближе всего к равновесной шероховатости.

Наконец, рано или поздно, наступает предельный износ, соответствующий предельному состоянию детали. При этом речь идёт уже о катастрофическом изменении размеров и формы детали, приводящему к предельному состоянию, когда дальнейшая эксплуатация невозможна.

При воздействии растягивающих или сжимающих нагрузок соответственно меняются и остаточные напряжения (знак и величина) в поверхностном слое детали.

Опыты показывают, что детали длительное время подвергавшиеся действию переменных напряжений, разрушаются при напряжениях, значительно меньших, чем временное сопротивление σ_s (иначе предел прочности). Разрушение при циклическом нагружении происходит вследствие возникновения микротрещин в зоне концентрации напряжений. Трещины постепенно развиваются, проникая вглубь, поперечное сечение деталей ослабляется и в некоторый момент происходит мгновенное разрушение. Усталость охватывает две значительно отличающиеся друг от друга области циклического нагружения и деформирования. В первом случае при циклическом нагружении возникают значительные пластические деформации. Эта область называется малоциклового усталостью, и число циклов не превышает $10^4...10^5$. Другая область – циклическое нагружение, при котором деформация во время каждого цикла в значительной степени

упруга. Для этой области характерны малые напряжения (нагрузки) и большое число циклов до разрушения. Эта область называется многоцикловой усталостью и характеризуется долговечностью более $10^6 \dots 10^7$ циклов.

Опыты показывают, что детали длительное время подвергавшиеся действию переменных напряжений, разрушаются при напряжениях, значительно меньших, чем временное сопротивление σ_v (иначе предел прочности). Разрушение при циклическом нагружении происходит вследствие возникновения микротрещин в зоне концентрации напряжений. Трещины постепенно развиваются, проникая вглубь, поперечное сечение деталей ослабляется и в некоторый момент происходит мгновенное разрушение.

Момент возникновения и скорость распространения микротрещины зависит от характеристик микроструктуры материала, микротвердости поверхности и остаточных напряжений в поверхностном слое. При воздействии знакопеременных нагрузок активируется движение дислокаций и происходит, как правило, разупрочнение поверхности и изменение напряженного состояния поверхностного слоя, что приводит к изменению его эксплуатационных характеристик.

При воздействии агрессивных сред возникают адсорбционные и коррозионные процессы в поверхностном слое детали и формируется практически полностью новый поверхностный слой с совершенно отличными от исходных характеристиками (см. материал темы 1.1).

Также при эксплуатации детали могут работать в условиях высоких температур. Температура является катализатором всех процессов в поверхностном слое, так как резко возрастает скорость диффузионных процессов, скорость перемещения дислокаций, их энергия и др. Поэтому значительно, а иногда и катастрофически, меняется микротвердость поверхностного слоя, изменяются характеристики его напряженного состояния. В зависимости от температуры в поверхностном слое может меняться микроструктура вплоть до изменения фазового состава, когда происходит не только старение структуры, но ее отжиг, вплоть до оплавления границ зерен.

При эксплуатации, как правило, действует не один вид нагружения, а некоторый комплекс, который и приводит сначала к адаптации поверхностного слоя к условиям эксплуатации, а потом и к возникновению эксплуатационных дефектов в нем.

Эксплуатационные дефекты — это дефекты деталей, узлов, агрегатов, машин в целом, возникающие на стадии эксплуатации машин в результате изнашивания, коррозии, усталости и т. д., а также неправильного технического обслуживания или использования. Большинство деталей в процессе эксплуатации подвержено одновременно изнашиванию нескольких видов, почти всегда можно выделить ведущий вид, который и ограничивает работоспособность детали. Сопутствующие виды изнашивания в значительно меньшей мере снижают ее.

Сопряженные детали, вернее, поверхности деталей машин, имеющие относительное перемещение в процессе работы, изнашиваются под действием сил трения, сил трения с ударными нагрузками; более сложным является изнашивание при механических, тепловых, химических воздействиях. Интенсивность изнашивания зависит от механических и химических свойств материала поверхностей трения, вида трения (наличие или отсутствие смазочного материала, характера и величины нагрузки, вида сопряжения и шероховатости поверхностей, относительной скорости перемещения поверхностей трения, их взаимодействия с внешней средой и т.д.). В результате

изнашивания постепенно изменяются размеры и форма деталей. В сопряжении увеличиваются зазоры. Если зазор превышает допустимое значение, в сопряжении возникают ударные нагрузки. Интенсивность изнашивания при этом возрастает.

Можно выделить три периода изнашивания сопряженных поверхностей деталей машин. Период приработки a (рис. 1.10) характеризуется интенсивным изнашиванием поверхностей трения. Постепенно изнашивание уменьшается и наступает период b , характеризующийся относительным постоянством скорости изнашивания в данных конкретных условиях работы сопряженной пары. Затем достигается некоторая величина износа, предельная для данного сопряжения, после превышения которой износ прогрессивно возрастает (период $в$). Резко изменяются размеры и форма деталей, а следовательно, и зазоры. Нарушается нормальное взаимодействие деталей, необходим их ремонт или замена.

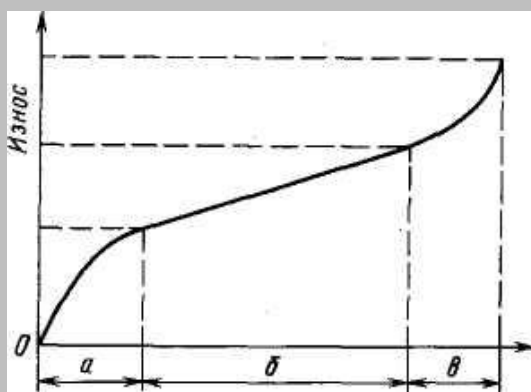


Рис. 1.10. Зависимость износа деталей от времени работы

Различают следующие виды изнашивания при трении деталей машин: механическое, абразивное, гидроабразивное, газоабразивное, эрозионное, усталостное, кавитационное, изнашивание при заедании, коррозионно-механическое.

Абразивное — механическое изнашивание, которое усиливается режущим или царапающим действием твердых частиц; возникает при наличии в зоне трения абразивных частиц, попадающих в зону трения как снаружи, так и в процессе трения.

Гидроабразивное — изнашивание в результате воздействия твердых частиц, увлекаемых потоком жидкости, а газоабразивное — в результате воздействия твердых частиц, увлекаемых потоком газа (трубопроводы жидкостей и газов могут подвергаться такому изнашиванию при попадании внутрь абразивных частиц; это нередко случается в гидросистемах станков).

Эрозионное — изнашивание, возникающее в процессе воздействия потока жидкости или газа. Вызывает собственно эрозионное разрушение при обтекании деталей потоком жидкости или газа; вследствие ударов о поверхность металла мельчайшие частицы потока разрушают его поверхностный слой. Эрозионное изнашивание возрастает с повышением шероховатости поверхности и с увеличением кинетической энергии частиц потока, особенно если деталь или поток имеют высокую температуру. Например, роторы турбин подвержены воздействию высокотемпературных потоков жидкостей, паров, газов (в зависимости от типа турбины), т. е. интенсивному эрозионному изнашиванию. Эрозионное изнашивание может выражаться в виде равномерного сцарапывания мельчайших частичек поверхностного слоя детали либо в виде явно выраженного локального разрушения поверхности.

Усталостное — изнашивание поверхности трения или ее отдельных участков при деформировании, приводящем к возникновению трещин и отделению частиц материала детали. Возникает при трении без смазочного материала, а при наличии смазочного материала — при давлениях, превышающих предел текучести материала поверхностных слоев. Причины, вызывающие усталостное изнашивание материала: микропластические деформации сжатия, упрочнения и разупрочнения поверхностных слоев, возникновение остаточных напряжений и особые явления усталости материала.

Изнашивание при заедании — происходит в результате схватывания, глубинного вырывания металла, переноса его с одной поверхности трения на другую. Повреждения поверхностей деталей, характерные для изнашивания схватыванием, имеют большое распространение. Из существующих видов изнашивания этот вид является самым нежелательным, так как сопрягаемые детали разрушаются интенсивно, в ряде случаев — моментально, причем частицы металла отделяются с одной поверхности трения и налипают на сопряженную, причем в дальнейшем они действуют как абразив.

Тепловое изнашивание — возникает при трении скольжения с большими скоростями относительного перемещения поверхностей трения, большими давлениями, вызывающими интенсивное увеличение температуры в поверхностных слоях сопряженных деталей, работающих без смазочного материала или при недостаточном его количестве. Физика теплового изнашивания проста: при трении происходит мгновенный нагрев тонких поверхностных слоев металла. Температура поверхностей фактического контакта достигает 900°C , максимальная же может достичь и температуры плавления металла. В машиностроении тепловому изнашиванию подвержены детали передач зацеплением, подшипники скольжения, детали кривошипно-шатунных механизмов и т. д. при прекращении подачи смазочного материала к узлам трения.

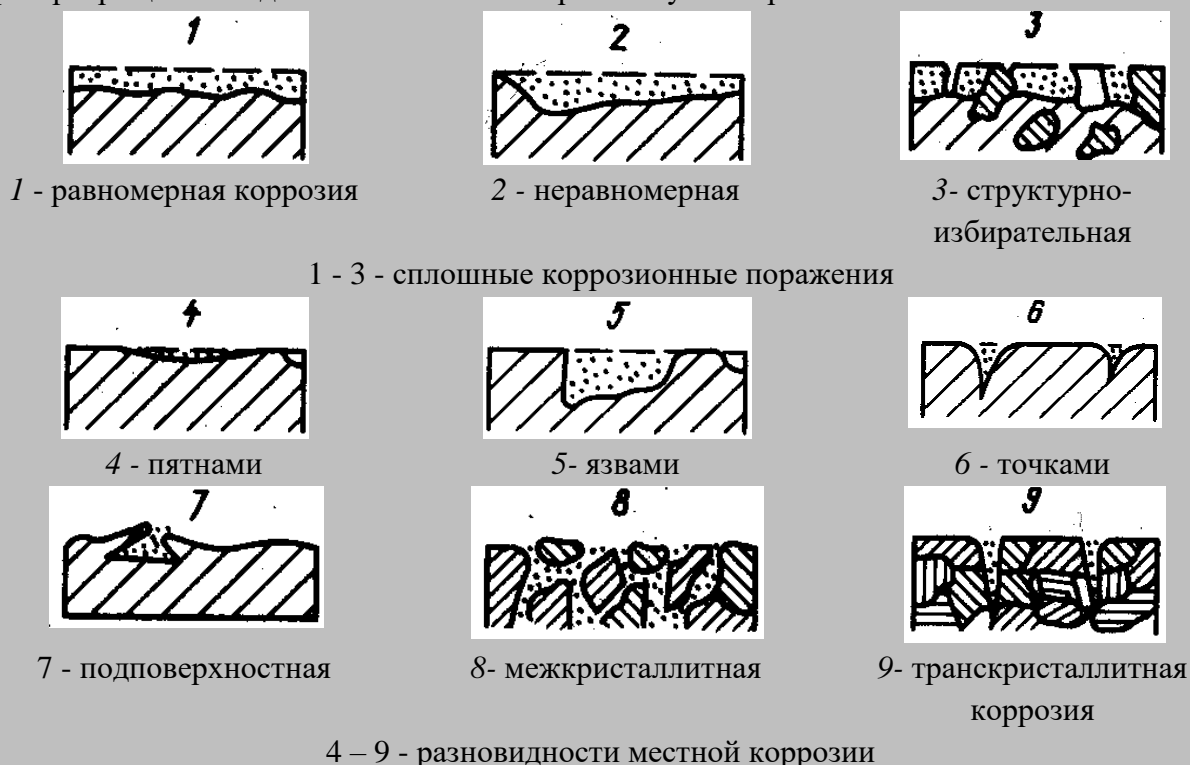


Рис. 1.11. Виды коррозионных разрушений (поражений)

Коррозия деталей машин происходит в результате их химического или электрического взаимодействия с внешней средой. Различают коррозию атмосферную, газовую, контактную, под напряжением в неэлектролитах и в электролитах (рис. 1.11).

Детали, соприкасающиеся с атмосферой, подвергаются атмосферной коррозии под действием влаги (дождь, снег), а также различных окислов и солей, содержащихся в воздухе, особенно около больших городов и в приморских районах. Резкие перепады температуры также способствуют коррозии, так как сопровождаются конденсацией влаги.

Коррозия под влиянием газовой среды при высоких температурах обусловлена взаимодействием металла с продуктами сгорания топлива. Этому виду коррозии в процессе эксплуатации подвержены детали энергетических машин. Под влиянием испарения и брызг электролитов значительно корродируется оборудование гальванических линий.

Дефекты, вызванные усталостью. Усталость — процесс постепенного накопления повреждений материала под действием повторно-переменных нагрузок, приводящий к снижению долговечности, разрушению материала деталей машин, сборочных единиц. Процессы развития усталости ведут к тому, что в наиболее слабом месте детали или конструкции возникают микротрещины, развивающиеся в дальнейшем в усталостные, которые вызывают внезапное разрушение детали без видимых предварительных пластических деформаций. Эксплуатация пассажирских самолетов сверх назначенного ресурса может привести к разрушению прямо в воздухе. Таков эффект усталостного разрушения. Сильное влияние на снижение выносливости деталей оказывают резкие смены температуры (термическая усталость), так как при этом в поверхностных слоях детали периодически возникают напряжения сжатия и растяжения. Термическая усталость проявляется в деталях горячего тракта энергетических машин.

Заметно снижает предел выносливости деталей машин коррозия. При одновременном воздействии коррозии и переменных нагружений возникает так называемая коррозионная усталость, которая вызывает разрушение детали при значительно меньшем напряжении, чем позволяет истинный предел выносливости материала детали.

2.1 Классификация показателей качества поверхностного слоя деталей машин

Под качеством поверхности понимают состояние поверхностного слоя материала детали. Поверхностный слой включает в себя наружную поверхность, которая контактирует с окружающей средой, и нижележащий слой материала с измененными по сравнению с основной частью (сердцевинной) строением и свойствами (механическими, физическими, химическими). Качество поверхностного слоя деталей машин определяется геометрией неровностей поверхности (шероховатость, волнистость и макроотклонения), физическим состоянием металла поверхностного слоя и его напряженностью.

Классификация показателей качества поверхностного слоя приведена в табл. 2.1. Эта классификация наиболее полно отражает физическую характеристику качества поверхностного слоя и устанавливает единые показатели для оценки влияния многочисленных технологических вариантов обработки на эксплуатационные свойства деталей. Данная классификация наряду с известными критериями шероховатости и волнистости, глубины и степени наклепа, остаточных макронапряжений содержит параметры кристаллической решетки, плотность дислокаций и концентрацию вакансий,

размеры блоков, фрагментов и их взаимную разориентировку, микронапряжения и напряжения 3-го рода.

Табл. 2.1 Классификация показателей качества поверхностного слоя

Группа показателей	Подгруппа показателей	Наименование показателей	Обозначение	Единицы измерения
Геометрические показатели качества поверхности	Шероховатость	Высота неровностей профиля по десяти точкам	R_z	мкм
		Среднее арифметическое отклонение профиля	R_a	мкм
		Наибольшая высота неровностей профиля	R_{max}	мкм
		Средний шаг неровностей по вершинам локальных выступов	S	мкм
		Средний шаг неровностей;	S_m	
		Опорная длина профиля	η_p	мкм
		Относительная опорная длина профиля (p - уровень сечения профиля)	t_p	-
	Волнистость	Максимальная высота волнистости поверхности	W_{max}	мкм
		Средний шаг волнистости поверхности	S_W	мкм
		Средняя высота волнистости по десяти точкам	W_z	мкм
	Направление неровностей	Угол между направлением неровностей и на правлением действия внешней нагрузки	-	град.
Физико-механические показатели качества поверхностного слоя	Степень деформации	Степень деформации отдельных зерен	$\varepsilon_{зр}$	%
		Степень деформации слоев (совокупности зерен)	$\varepsilon_{пс}$	%
	Деформационное упрочнение (наклеп)	Глубина наклепа	h_H	мкм
		Степень наклепа	u_H	%
		Градиент наклепа	$u_{гр}$	кгс/мм ³
	Субструктура	Размеры фрагментов	l_ϕ	мкм
		Размеры блоков	$l_{\bar{o}}$	мкм
		Угол разориентировки фрагментов	a_ϕ	градусы
		Угол разориентировки блоков	$a_{\bar{o}}$	градусы
	Кристаллическая структура	Параметры решетки		А
		Плотность дислокаций		см ⁻²
		Концентрация вакансий		—
	Остаточные напряжения	Технологические макронапряжения		кгс/мм ²
		Микронапряжения		кгс/мм ²
		Напряжения 3-го рода		кгс/мм ²

Под дефектом понимают каждое отдельное несоответствие продукции установленным требованиям. Если изделие имеет дефект, то это означает, что по меньшей мере один из показателей его качества или один из параметров вышел за предельное значение, установленное стандартами, либо не выполнено какое-либо требование стандартов или технических условий. Техническое состояние машин в процессе эксплуатации не остается неизменным; оно ухудшается с увеличением наработки. Из-за износа и повреждений снижается работоспособность, а, следовательно, и надежность машин.

2.2 Геометрические показатели качества поверхностного слоя деталей машин

Идеально правильная поверхность не может быть получена в результате какого-либо метода обработки. Реальная поверхность физического тела несовершенна, и суждение о степени несовершенства зависит от масштаба рассмотрения. Можно рассматривать отклонения от геометрической правильности поверхности макрогеометрического, микро- и субмикроскопического порядка.

Макрогеометрические отклонения рассматриваются на больших участках реальной поверхности детали, они характеризуют точность формы детали; *микрогеометрия* — на малых участках реальной поверхности с длиной стороны квадрата от 1 мм до 1 мкм. Геометрическое представление о форме такой поверхности принято называть *шероховатостью*. Микрогеометрия поверхностей деталей, наряду с физико-механическими свойствами поверхностного слоя, является одним из основных факторов, определяющих эксплуатационные свойства и работоспособность машин, их ресурс и надежность.

Субмикроскопические неровности рассматриваются на участках поверхности, размер стороны квадрата которой измеряется от 1 до 10 мкм (10^{-3} - 10^{-2} мм, или 1000 - 10000 Å). Геометрические несовершенства этой области определяются молекулярной структурой поверхности, она пока не имеет специального назначения, почти совершенно не изучена, так как большей частью лежит за пределами чувствительности современных приборов.

Геометрические отклонения поверхностей различают в зависимости от отношения шага L к высоте неровностей H : при $L:H$ более 1000 — макроскопические отклонения или отклонения от правильной геометрической формы (конусность, овальность, вогнутость и др.), если $L:H$ от 50 до 1000 — волнистость поверхности и $L:H$ до 50 — шероховатость поверхности [29].

Шероховатость поверхности — совокупность неровностей с относительно малыми шагами, образующих рельеф поверхности. Шероховатость поверхности после механической обработки — это геометрический след режущего или деформирующего инструмента (металлического или абразивного), движущегося в соответствии с установленным режимом резания, искаженный в результате пластической и упругой деформации и сопутствующей процессу резания вибрацией технологической системы станок—приспособление—инструмент—деталь.

В стандарт на шероховатость поверхности ГОСТ2789-73 /25/ вошли следующие характеристики шероховатости:

- *высотные*: R_a -среднее арифметическое отклонение профиля; R_z - высота неровностей профиля по десяти точкам; R_{max} -наибольшая высота неровностей профиля;

- *шаговые*: S -средний шаг неровностей по вершинам локальных выступов; S_m -средний шаг неровностей; t_p -относительная опорная длина профиля, где p - уровень сечения профиля.

В основу количественной оценки характеристик шероховатости принята система отсчета, в которой в качестве базовой линии служит средняя линия профиля. Профиль поверхности со средней линией и другими параметрами в соответствии с ГОСТ 2789–73 приведен на рис. 2.1.

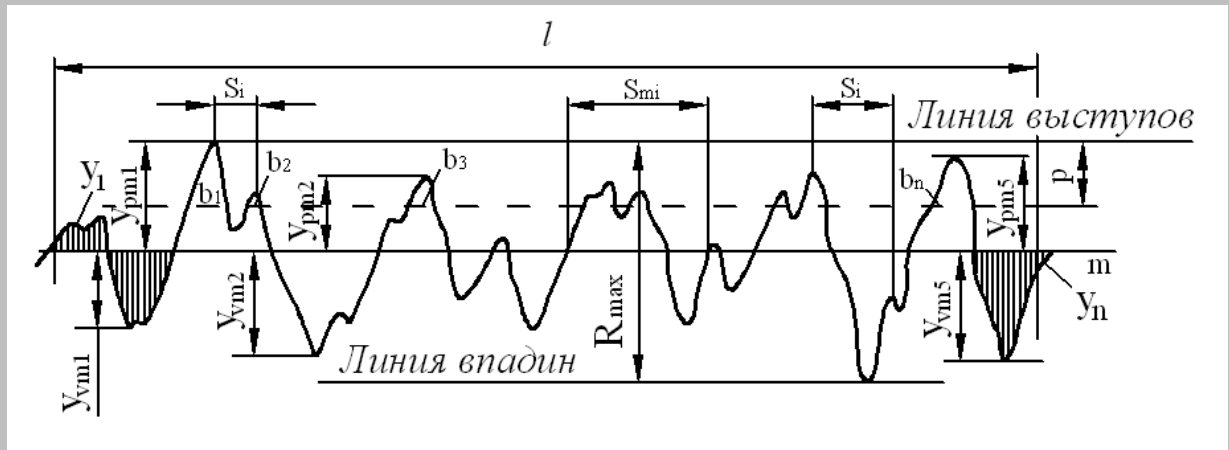


Рис. 2.1. Профиль поверхности и его характеристика

Средняя линия профиля – это базовая линия, имеющая форму номинального профиля и проведенная так, что в пределах базовой длины l среднее квадратическое отклонение точек профиля от этой линии минимально. Линия, эквидистантная средней линии и проходящая через высшую точку профиля в пределах базовой длины, называется *линией выступов профиля*. Линия, эквидистантная средней линии и проходящая через низшую точку профиля в пределах базовой длины, называется *линией впадин профиля*. Расстояние между линией выступов профиля и линией впадин профиля в пределах базовой длины представляет собой *наибольшую высоту неровностей профиля* R_{max} .

Высота выступов профиля – это расстояние от средней линии профиля до высшей точки выступа профиля.

Глубина впадины профиля y_{vm} – это расстояние от средней линии профиля до низшей точки впадины профиля.

Неровность профиля – это выступ профиля и сопряженная с ним впадина профиля.

Шаг неровностей профиля – это длина отрезка средней линии профиля S_{mi} , содержащая выступ профиля и сопряженную с ним впадину профиля. *Средний шаг неровностей профиля* S_m – это среднее значение шага неровностей профиля по средней линии в пределах базовой длины.

Шаг местных выступов S_i – это длина отрезка средней линии между проекциями на нее двух наивысших точек соседних местных выступов профиля. *Средний шаг местных выступов профиля* S – это среднее значение шага местных выступов в пределах базовой длины.

Для оценки шероховатости поверхности в машиностроении наибольшее распространение получили два высотных критерия R_z и R_a .

Высота неровностей профиля по десяти точкам R_z представляет собой сумму средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов профиля и глубин пяти наибольших впадин профиля в пределах базовой длины профиля l :

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 |y_{pmi}| + \sum_{i=1}^5 |y_{vmi}|}{5}, \quad (2.1)$$

где y_{pmi} – высота i -го наибольшего выступа профиля, y_{vmi} – глубина i -ой наибольшей впадины профиля.

Среднее арифметическое отклонение профиля R_a представляет собой среднее арифметическое абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины l :

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx \quad (2.2)$$

Или приближенно

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (2.3)$$

где y – отклонение профиля, определяемое расстоянием между любой точкой профиля и средней линией, l – базовая длина, n – число выбранных точек на базовой длине.

Многие эксплуатационные свойства поверхности зависят от фактической поверхности соприкосновения с сопряженными деталями, например контактная жесткость. Для приближенной оценки возможной поверхности контакта используется критерий η_p – *опорная длина профиля*, который определяется суммой длин отрезков в пределах базовой длины, отсекаемых на заданном уровне в материале профиля линией, эквидистантной средней линии. Для сопоставления опорных возможностей разных поверхностей, имеющих в том числе и одинаковые высотные характеристики неровностей профиля, пользуются критерием *относительной опорной длины профиля* t_p , который определяется отношением опорной длины профиля к базовой длине.

$$t_p = \frac{\eta_p}{l} = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n b_i \quad (2.4)$$

где b_i – длина отрезка, отсекаемого в материале выступа профиля, p – уровень сечения профиля, определяемый расстоянием между линией выступов профиля и линией, пересекающей профиль эквидистантно линии выступов профиля, выраженным в процентах от R_{max} .

Большое значение для поверхностей, работающих в условиях трения скольжения имеет направление неровностей. Типы направлений неровности в соответствии с ГОСТ 2789-73 представлены в табл. 3.2.

Для оценки несущей способности шероховатости в настоящее время наиболее широкое применение получила относительная опорная кривая профиля поверхности, построенная в относительных координатах (Рис. 3.2), описываемая уравнением (3.4). Эта кривая может быть использована и для косвенной оценки износостойкости поверхности.

$$t_p = b \epsilon^v, \quad (2.5)$$

где b, v – параметры начального участка опорной поверхности; ϵ – относительное расстояние от линии выступов $\epsilon = y/R_{max}$; y – расстояние от линии выступов, до рассматриваемого уровня, мкм.

Таблица 3.2. Типы направлений неровностей поверхности

Типы направлений неровностей	Схематическое изображение	Пояснение
Параллельное		Параллельно линии, изображающей на чертеже поверхность, к шероховатости которой устанавливаются требования
Перпендикулярное		Перпендикулярно линии, изображающей на чертеже поверхность, к шероховатости которой устанавливаются требования
Перекрещивающееся		Перекрещивание в двух направлениях наклонно к линии, изображающей на чертеже поверхность, к шероховатости которой устанавливаются требования
Произвольное		Различные направления по отношению к линии, изображающей на чертеже поверхность, к шероховатости которой устанавливаются требования
Кругообразное		Приблизительно кругообразно по отношению к центру поверхности, к шероховатости которой устанавливаются требования
Радиальное		Приблизительно радиально по отношению к центру поверхности, к шероховатости которой устанавливаются требования

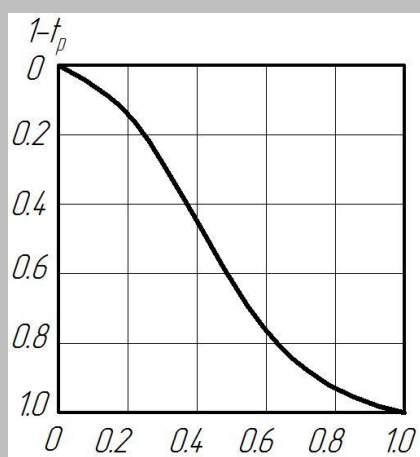


Рис. 2.2. Опорная кривая профиля.

Волнистость поверхности, согласно рекомендации СЭВ РС3951-73 - это совокупность периодически повторяющихся неровностей, у которых расстояния между смежными возвышенностями или впадинами превышают базовую длину для имеющейся шероховатости поверхности. Физически обоснованной, а тем более естественной физической границы между шероховатостью и волнистостью поверхности как совокупностью неровностей с шагами, превышающими базовую длину, не имеется.

Однако, наличие волн на поверхности приводит к уменьшению опорной площади в 5—10 раз по сравнению с ровной шероховатой поверхностью.

По рекомендации СЭВ (РС 3951-73) для оценки волнистости поверхности следует учитывать максимальную высоту волнистости W_{\max} , среднюю высоту волнистости по десяти точкам W_z , вычисляемые аналогично параметрам R_{\max} и R_z шероховатости поверхности, и средний шаг волнистости S_w , определяемой как среднее арифметическое расстояние из пяти значений между волнами на пяти равновеликих отдельных участках измерений волнистости (аналогично шагу S_m для шероховатости). Волны могут образовываться на детали в двух взаимно перпендикулярных направлениях, в связи с чем рекомендуется различать продольную и поперечную волнистость.

2.3 Физико-механические показатели качества поверхностного слоя деталей машин

В поверхностном слое деталей машин следует различать его наружную поверхность, которая соприкасается с внешней средой, поверхностный слой и его верхнюю часть — граничный слой. Специфичность химических, физических и энергетических условий на внешней поверхности резко выделяет эту часть поверхностного слоя, названного граничным слоем.

Поверхность твердого тела, по сравнению с его внутренним строением, имеет ряд особенностей. Любой атом, расположенный внутри твердого тела с идеальной кристаллической решеткой, находится в состоянии подвижного устойчивого равновесия, поскольку для него по всем направлениям интенсивность силового поля одинакова. В ином положении оказываются атомы, которые находятся у поверхности; они имеют только односторонние связи — в тело металла, поэтому их состояние неуравновешенное, неустойчивое, они более активны, обладают избыточной энергией (свободной) по сравнению с атомами, находящимися в объеме. При этом атомы остаются на поверхности там, где были в момент ее образования, это и обеспечивает твердым телам макроскопическую неизменяемость. Поверхностная энергия граничного слоя в них создается примерно в двух слоях атомов (на толщине порядка 10^{-6} — 10^{-7} см). Этим и определяется понятие «наружная поверхность» твердого тела.

Физическое состояние (структура, свойства) и напряженность поверхностного слоя детали в основном являются следствием упруго-пластической деформации и местного нагрева, возникающих в зоне механической обработки резанием или поверхностным пластическим деформированием, а также явлениями диффузии адсорбированных атомов из окружающей среды. В связи с этим для оценки физического состояния поверхностного слоя детали после механической обработки рекомендуются следующие показатели.

Степень пластической деформации. Пластическую деформацию характеризуют изменением степени пластической деформации по глубине поверхностного слоя (послойная степень деформации) $\varepsilon_{\text{пс}}$ и степенью деформации отдельных зерен $\varepsilon_{\text{зр}}$.

Деформационное упрочнение (наклеп). Деформационное упрочнение поверхностного слоя оценивают глубиной h_n и степенью наклепа u_n , а интенсивность наклепа по глубине поверхностного слоя — градиентом наклепа $u_{\text{гр}}$, являющимся особенно важным показателем поверхностного наклепа после окончательной и отделочной обработки поверхностей силовых деталей:

$$u_n = \frac{H_{\mu \max} - H_{\mu \text{исх}}}{H_{\mu \text{исх}}} = \frac{\Delta H_{\mu}}{H_{\mu \text{исх}}} \quad (2.6)$$

$$u_{\text{сп}} = \frac{H_{\mu \max} - H_{\mu \text{исх}}}{h_H} = \frac{\Delta H_{\mu}}{h_H} \quad (2.7)$$

где $H_{\mu \max}$ и $H_{\mu \text{исх}}$ — максимальная и исходная микротвердость металла поверхностного слоя.

Непосредственное определение степени деформации поверхностного слоя имеет известные трудности, поэтому обычно ограничиваются определением параметров деформационного упрочнения.

Для определения глубины, степени и градиента наклепа наибольшее распространение получили методы измерения микротвердости на поверхности косых шлифов и при послойном стравливании, а также методы рентгеноструктурного анализа.

Микроструктура металлов и сплавов характеризуется величиной зерна и расположением его, формой, размером (бальностью) и количеством различных фаз.

Основными показателями для характеристики субструктуры металла поверхностного слоя рекомендуются размеры фрагментов l_{ϕ} и блоков l_{δ} и углы разориентировки их a_{ϕ} , a_{δ} . Оценку искаженности кристаллической решетки металла поверхностного слоя можно производить по параметрам решетки, плотности дислокаций и концентрации вакансий.

Микротвердость — это твердость малых участков материала и отдельных структурных составляющих, это свойство металла сопротивляться проникновению в него другого более твердого тела определенной формы и размеров, не получающего остаточной деформации. При исследовании наклепанного слоя рассматривают величину микротвердости и глубину, на которой отмечается ее изменение.

Остаточные напряжения. Появление остаточных напряжений связано с условиями изготовления деталей, с их предысторией. Поэтому технологические процессы изготовления деталей должны проектироваться с таким расчетом, чтобы возникающие в поверхностных слоях остаточные напряжения гарантировали надежность работы деталей в заданных условиях эксплуатации.

В реальных условиях в большинстве случаев остаточные напряжения возникают в условиях одновременного действия различных факторов: механических, тепловых и физико-химических. Так, при пластической деформации деталей из сложных сплавов остаточные напряжения могут возникнуть от одновременного неоднородного протекания процессов пластической деформации и фазовых превращений. Напряжения в металле или сплаве, независимо от причин, их вызывающих (от воздействия сил, тепла, частиц высокой энергии и др.), в физике твердого тела рассматриваются как следствие искажения кристаллической решетки.

Остаточные напряжения можно классифицировать по признакам протяженности силового поля и по физической сущности. Общепринятой является классификация по первому признаку:

- Напряжения 1-го рода — макронапряжения, охватывающие области, соизмеримые с размерами детали; они имеют ориентацию, связанную с формой детали; неоднородное деформированное состояние детали может возникнуть после неоднородной

пластической деформации в результате обработки металла или детали волочением, прокаткой, ковкой, холодной правкой, резанием, механическим упрочнением поверхности, а также вследствие неоднородной пластической деформации при нагреве и охлаждении; вследствие неоднородного изменения объема при фазовых превращениях, как в твердом состоянии (закалка, старение, цементация стали твердым карбюризатором и другие физико-химические процессы), а также при неоднородном протекании фазовых превращений из жидкого в твердое состояние и наоборот (цементация в жидких ваннах, электролитическое осаждение металлов, усадка при кристаллизации отливки) и из твердого в газообразное состояние и наоборот (азотирование, цианирование и газовая цементация стали).

- Напряжения 2-го рода — микронапряжения, распространяющиеся на отдельные зерна металла или на группу зерен; они возникают в поликристаллических металлах в процессе деформации больших объемов в результате взаимодействия зерен между собой, к ним относят также и напряжения внутри отдельного зерна, обусловленные мозаичностью его структуры — результат взаимодействия между отдельными блоками. Микронапряжения являются следствием неоднородности физических свойств различных компонентов поликристалла, а также стесненных условий деформации отдельного зерна и анизотропии свойств внутри него. Основными причинами возникновения микронапряжений являются фазовые превращения, изменения температуры, анизотропия механических свойств отдельных зерен, границы зерен и распад зерна на блоки при пластической деформации. В процессе старения в микро- и субмикроскопических объемах возникают локализованные резкие концентрации напряжений. При изменении температуры микронапряжения могут возникнуть из-за наличия в металле различных по природе компонентов с различными коэффициентами линейного расширения (например, зерна графита в чугунах, случайные включения), а также из-за анизотропии свойств отдельных зерен, особенно для металлов с некубической решеткой, обуславливающей различие в величине линейного расширения по разным кристаллографическим осям.

- Напряжения 3-го рода — субмикроскопические, относящиеся к искажениям атомной решетки кристалла; ориентация их связана со структурой атомной решетки. В этом случае термин «напряжения» является весьма условным и более правильно пользоваться термином «статические искажения решетки» или «искажения 3-го рода». Причиной образования искажений кристаллической решетки являются главным образом дислокации и внедренные атомы. Различают термодинамические и статические искажения кристаллической решетки. Искажения решетки, вызванные тепловыми колебаниями, всегда имеются в кристалле, находящемся при температуре выше 0°K . Распределение этих искажений непрерывно изменяется, поэтому такие искажения называют динамическими. Распределение искажений, вызванных присутствием в решетке растворенных атомов и различного рода несовершенств структуры, при низких температурах остается постоянным, поэтому такие искажения называют статическими.

Напряженное состояние поверхностного слоя детали может характеризоваться наличием как сжимающих, так и растягивающих напряжений, максимальное значение которых не всегда имеет место на поверхности, а смещается в глубь поверхностного слоя.

Величина и знак макронапряжений определяются, прежде всего, дислокационной структурой и характером распределения дислокаций и других несовершенств решетки по глубине деформированного поверхностного слоя.

Границы зерен. Особенности кристаллического строения межзеренного граничного слоя обуславливают и различие напряженного состояния между зернами и внутри зерна. Толщина граничного слоя состоит из небольшого числа атомных слоев (примерно на один порядок меньше зерна), вследствие чего напряжения на границах зерен будут как бы переходными между микронапряжениями и напряжениями 3-го рода. Скопление большого количества дислокаций в межзеренных граничных слоях вызывает многочисленные искажения атомной решетки, а это порождает напряжения 3-го рода. Наряду с этим граничный слой — зона силового взаимодействия между отдельными зернами, которое создает поле микронапряжений, охватывающих всю поверхность зерна.

Распад зерна на блоки. Разделение объема зерна на блоки (мозаичность структуры) создает в зерне микронапряжения. Причиной возникновения их являются вновь образовавшиеся границы между блоками, строение которых во многом подобно границам зерен. В граничном слое между блоками накапливаются дислокации и атомы примесей, которые искажают кристаллическую решетку и порождают напряжения. С увеличением деформации зерна растет и степень мозаичности его, вырастают неупругие изгибы, оказывающие влияние на развитие системы блоков, их разориентировку, а это будет способствовать дальнейшему усилению неравномерностей деформации отдельных блоков. В процессе деформации наряду с дроблением зерен на области, разделенные дислокационными стенками и малоугловыми границами, происходит также сложная упругая деформация зерен в целом и отдельных блоков. Эта упругая деформация может быть вызвана и действием соседних зерен, и образованием избыточных дислокаций одного знака внутри блоков при деформации. В результате такой упругой деформации в пределах зерен и блоков межплоскостные расстояния изменяются неоднородно (рис. 3.3).

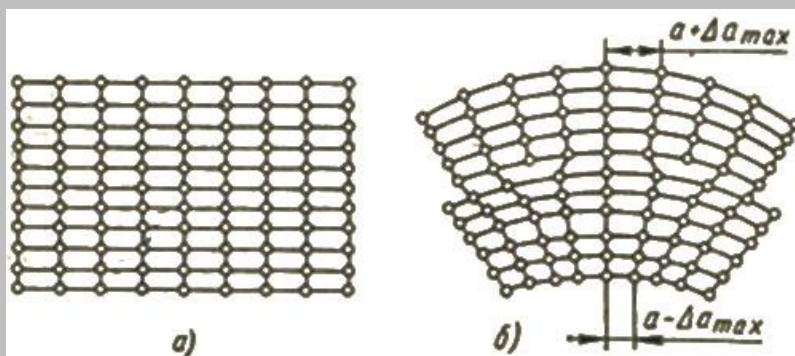


Рис. 2.3. Схема неоднородного изменения межплоскостных расстояний при изгибе: а — до изгиба; б — после изгиба

Если обозначить абсолютное максимальное упругое отклонение периода решетки через Δa , то отношение $\Delta a/a$ будет характеризовать величину максимального упругого отклонения межплоскостных расстояний от равновесных. Величину $\Delta a/a$ принимают за характеристику микронапряжений или искажений 2-го рода. Эти искажения вызывают уширение линий рентгенограммы Δb , но подчиняются другим закономерностям, чем уширение за счет измельчения размеров блоков. Величину $\Delta a/a$ определяют по формуле

$$\frac{\Delta a}{a} = \frac{\Delta b}{4tg\Theta} \quad (2.8)$$

где Θ — угол отражения линии рентгенограммы.

Упругая деформация зерна вероятнее всего вызывает только некоторое перераспределение микронапряжений и выравнивание их. При рентгеновских

исследованиях после упругопластической деформации обнаруживаются микронапряжения в отдельных зернах. Пластическая деформация, вызывающая распад зерна на блоки, сопровождается образованием значительных микронапряжений, по величине близких к пределу текучести.

Отличие макро - от микронапряжений заключается не только в величине масштаба проявления их. Макронапряжения могут возникать в любой сплошной однородной изотропной среде. Микронапряжения в таком материале существовать не могут, они могут возникнуть вследствие существенной неоднородности кристаллического материала и его анизотропных свойств.

Искажения кристаллической решетки (напряжения 3-го рода) в напряженном состоянии твердого тела играют важную роль. Напряжения 3-го рода, связанные с отклонением атомов от положения равновесия в решетке, и микронапряжения характеризуют энергетический уровень обрабатываемого металла. Повышение энергетического уровня в наклепанном металле делает его термодинамически неустойчивым при всех температурах, он всегда стремится перейти в более стабильное состояние с меньшей свободной энергией.

Анизотропия механических свойств в отдельных зернах. В реальном поликристаллическом металле вместо предполагаемого по расчету равномерного распределения напряжений от действия внешней нагрузки имеет место значительная неравномерность напряжений (деформаций) в отдельных зернах металла. Неравномерная пластическая деформация обуславливается разницей в модулях упругости различных агрегатов, образующих поликристалл, а также неодинаковой способностью деформироваться по разным кристаллографическим осям одного и того же зерна, которая определяется величиной модулей упругости E и G . При отсутствии преобладающей ориентации зерен величину неравномерности напряжений в какой-то мере характеризует отношение максимальных и минимальных значений модуля упругости. По упрощенным теоретическим расчетам для металлов с кубической решеткой неравномерность напряжений составляет примерно 30%. В действительности степень неравномерности значительно выше. В поликристалле даже при макроскопически однородном поле напряжений пластическая деформация распределяется в микрообъемах неравномерно, степень неравномерности при этом достигает 400—500%. С развитием пластической деформации разница в напряжениях отдельных зерен должна снижаться. При разгрузке около пластически деформированных зерен возникает зона микронапряжений. Повторные нагружения еще больше усложняют картину распределения напряжений в микрообъеме. Таким образом, анизотропия механических свойств при повторных нагружениях может привести к возникновению неравномерно распределенных микронапряжений.

Для измерения макронапряжений в основном применяются: механический и рентгеновский методы. Механический метод основан на замере прогиба или деформации на стержнях прямоугольного сечения и пластинах, или на кольцах и полосках, вырезанных из тонкостенной трубы (втулки). Рентгеновский метод, позволяющий вычислить макронапряжения непосредственно в любой точке на поверхности без разрушения детали. Точность определения напряжений относительно невысокая (± 5 —20 кгс/мм²). Возникают также трудности при разделении макро- и микронапряжений в наклепанных поверхностных слоях. Микронапряжения и искажения кристаллической решетки определяются только с помощью методов рентгеноструктурного анализа.

Как уже упоминалось, показатели качества поверхности оказывают решающее влияние на ее эксплуатационные свойства. Причем для каждого эксплуатационного свойства есть определенный набор показателей качества, которые и формируют это свойство, одни в большей степени, другие в меньшей. В таблице 3.3 представлена взаимосвязь эксплуатационных свойств деталей машин с показателями качества их поверхности с градацией по степени их влияния.

Табл. 2.3. Взаимосвязь эксплуатационных свойств деталей машин с показателями качества их поверхностей и поверхностных слоев

Эксплуатационные свойства	Геометрические характеристики поверхности											Физико-механические характеристики поверхностного слоя			
	Шероховатость								Волнистость			Наклеп поверхностного слоя		Остаточные напряжения	
	R _a	R _z	R _{max}	S _m	S	t _p	r	r _г	W _a	W _{max}	S _w	H	h	σ	h _σ
Износостойкость: трение без смазочного материала	+	+	+	+		+ ^{*1}	+ ^{*1}		+	+	+		+ ^{*1}	+ ^{*1}	+ ^{*1}
Трение	+ ^{*1}	+	+	+ ^{*1}	+	+ ^{*1}	+ ^{*1}	+	+ ^{*1}	+	+ ^{*1}	+ ^{*1}		+ ^{*1}	
Трение со смазочным материалом	+ ^{*1}	+	+	+ ^{*1}	+	+ ^{*1}	+	+	+ ^{*1}	+	+ ^{*1}				
Избирательный перенос ^{*2}	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+ ^{*1}		+ ^{*1}	
Сопротивление усталости	+	+	+ ^{*1}	+				+ ^{*1}		+ ^{*1}	+	+ ^{*1}	+ ^{*1}	+ ^{*1}	+ ^{*1}
Контактная жесткость	+	+	+	+		+ ^{*1}	+ ^{*1}		+	+	+	+ ^{*1}		+	
Виброустойчивость	+	+	+	+ ^{*1}		+ ^{*1}	+ ^{*1}		+		+	+ ^{*1}	+	+	+
Коррозионная стойкость	+	+	+	+ ^{*1}	+	+		+	+ ^{*1}	+	+	+ ^{*1}	+ ^{*1}	+ ^{*1}	+ ^{*1}
Прочность соединения с натягом	+	+		+		+ ^{*1}	+ ^{*1}		+		+	+			
Плотность (герметичность) соединений	+ ^{*1}	+	+	+	+	+ ^{*1}			+ ^{*1}	+	+				
Прочность сцеплений покрытий	+	+ ^{*1}	+	+ ^{*1}		+	+	+	+	+	+	+ ^{*1}	+	+ ^{*1}	+
Обтекаемость газами и жидкостями	+	+	+	+	+ ^{*1}	+ ^{*1}	+	+ ^{*1}	+	+	+				

^{*1} Характеристики, оказывающие основное влияние на данное эксплуатационное свойство.

^{*2}Избирательный перенос (ИП) — вид фрикционного взаимодействия, характеризуемый в основном молекулярной составляющей силы трения. Устойчивым признаком ИП является образование защитной металлической пленки, обладающей способностью снижать трение и уменьшать износ.

Обозначения:

Ra — среднее арифметическое отклонение профиля,

Rz — высота неровностей профиля по десяти точкам,

Rmax — наибольшая высота неровностей профиля,

Sm — средний шаг местных выступов профиля;

t_p — относительная опорная длина профиля,

r — радиус закругления выступов;

r' — радиус закругления впадин,

Wa — среднее арифметическое отклонение профиля волн,

Wmax — наибольшая высота волн,

Sw — средний шаг неровностей волн;

H — микротвердость поверхностного слоя,

h — глубина наклепанного слоя,

σ — остаточные напряжения на поверхности,

h_σ — глубина залегания остаточных напряжений.

2.4 Дефектность поверхностного слоя

Производственные дефекты обычно возникают из-за нарушений требований технологических регламентов, режимов обработки и контроля качества. Кроме того, производственные дефекты могут возникать в результате неправильно разработанных технологических процессов.

Производственные дефекты по существу во многом сходны с дефектами конструктивными. Недостаточная чистота поверхности детали - шлифовали или хонинговали в один переход вместо двух положенных для скорости. Нарушения норм точности прецизионного станка могут быть связаны с целым комплексом причин: от некачественно проведенных финишных операций механической или слесарной (шабрение) обработки до небрежно выполненных сборочных операций.

Производственные дефекты, возникающие из-за нарушения или несовершенства технологических процессов, контролируют и выявляют, как правило, на том этапе производства, когда их возникновение всего вероятнее. Чем дальше от места возникновения обнаруживается производственный дефект, тем дороже он обходится машиностроителям. Например, в корпусе редуктора пристаночного робота (отливка из алюминиевого сплава) имеется один или несколько литейных дефектов. При обнаружении в литейном цехе эти дефекты были бы либо устранены, либо отливку забраковали бы и отправили на переплавку. Но в результате плохого контроля отливка не была своевременно забракована. Ее отправили в механический цех завода вместе с качественными литыми заготовками и обработали. Дефекты и здесь не были обнаружены. В сумму потерь теперь войдет и стоимость станочной обработки. Готовый робот (с дефектным корпусом редуктора) попадет к потребителю. Его установят в робототехнический комплекс (РТК), где он станет обслуживать станок-автомат. Здесь в процессе эксплуатации из-за дефектов, ослабляющих конструкцию, редуктор под

рабочими нагрузками может разрушиться либо потечет — т.е. утратит работоспособное состояние. Робот выходит из строя. РТК прекращает работу. Ремонт превращается в серьезную проблему: ведь запасных корпусов редукторов ни один завод не поставляет. Потери составят сумму, превышающую в сотни, а то и в тысячи раз потери при обнаружении брака литья. А если дефекты пропущены не в корпусе редуктора, а в оси автомобиля, в роторе турбины, в деталях авиационных двигателей? Тогда неминуемы аварии, возможна гибель людей...

Типичными дефектами на основных переделах машиностроительного производства являются:

Дефекты литья:

- отклонение химического состава металла от заданного вследствие нарушения состава шихты (нормы вклада компонентов) или режима плавки; следствие — отклонение от заданных стандартом физико-механических свойств отливки, что может привести к преждевременному разрушению, износу изготовленной из нее детали;
- ликвация — несоответствие химического состава заданному в некоторых зонах отливки; в месте ликвации механические характеристики металла отливки могут быть пониженными;
- газовые поры — оставшиеся после кристаллизации (затвердевания) внутри отливки или в ее поверхностном слое растворенные в жидком металле газы; они имеют форму округлых пузырьков и гладкую поверхность; появляются в результате плохой газопроницаемости литейных формовочных смесей, плохой вентиляции формы, неудовлетворительного качества металла и высокой температуры его заливки, т. е. в результате нарушений технологии; газовые поры на точных рабочих поверхностях деталей машин и станков недопустимы;
- усадочные раковины — пустоты, образующиеся в отливке из-за нарушения правильности усадки металла при ее охлаждении, вследствие нарушения равномерности охлаждения или нехватки металла в процессе затвердевания; обычно усадочные раковины располагаются в верхней части отливок; если место отливки, где расположены усадочные раковины, можно удалить без вреда для заготовки детали, то это делают в литейном цехе, в остальных случаях отливку бракуют;
- спай или неслитины — места отслоений металла отливок; появляются в результате нарушения технологического процесса заливки металла в форму; это серьезное повреждение заготовки; незамеченный спай может резко ухудшить механические свойства детали, прежде всего — ее прочность;
- горячие трещины — несплошности внутри отливки либо с выходом на поверхность; внутренние поверхности горячих трещин обычно окислены (корродированы); они образуются в момент кристаллизации металла в местах перехода от толстых сечений отливок к тонким; причины появления горячих трещин — неправильная конструкция отливок (конструктивный дефект), высокая температура заливаемого металла, неравномерное охлаждение отливки и другие нарушения технологии литья;
- холодные трещины — несплошности, возникающие при более низких температурах затвердевания отливки; их поверхность не имеет окисления и напоминает свежий излом; появляются в результате резкого изменения температуры отливок (выбросили на мороз) и от ударов, возникающих при бросании горячих отливок, при их обрубке.

Дефекты обработки давлением:

- поверхностные и внутренние трещины и разрывы — несплошности материала заготовок, полученных штамповкой, ковкой, прокатыванием; при обработке давлением металл неоднократно подвергается нагреву, охлаждению, воздействию больших растягивающих и сжимающих сил, что приводит к возникновению как термических, так и механических напряжений, способствующих образованию внутренних разрывов и трещин; форсирование режимов обработки давлением (подач, температур, скорости нагрева и др.) способствуют возникновению дефектов; лишь строгий подбор и соблюдение режимов, соответствующих физико-механическим свойствам обрабатываемых материалов, гарантируют высокое качество заготовок;

- утонение и разрывы — дефекты деталей, получаемых из листового материала методом штамповки; если разрывы материала можно определить визуально, особенно у средних и крупных деталей (детали кузова легковых автомобилей и т. п.), то недопустимую степень утонения материала можно определить только специальными методами неразрушающего контроля; как правило, эксплуатационная надежность деталей, получаемых методом глубокой вытяжки, определяется не столько отсутствием разрывов, сколько предельно допустимой степенью утонения материала, которой он может достичь в наиболее деформированных зонах; при эксплуатации деталей, полученных глубокой вытяжкой, в результате знакопеременных нагрузок может наступить разрушение детали в зоне утонения, поэтому по мере увеличения объема листовой штамповки (автомобиле-, тракторо-, краностроение) все более актуальной становится проблема автоматизации контроля степени утонения металла при вытяжке;

- риски, волосовины, закаты, плены, расслоения, торцовые трещины и другие дефекты, связанные с нарушением технологического цикла при обработке металлов давлением, хорошо известны и металлургам, и прокатчикам, и машиностроителям; эти часто трудно выявляемые дефекты являются предметом постоянных забот создателей материалов, заготовок и машин.

Дефекты обработки резанием:

- прижоги, шлифовальные трещины — дефекты, возникающие в поверхностном слое при его резком нагреве и последующем охлаждении в процессе шлифования абразивным и алмазным инструментом; дефекты представляют собой либо небольшой площади закаленные участки, либо участки с сеткой трещин на поверхности детали; трещины малых размеров не имеют определенной ориентации, часто располагаются в виде сетки; они могут быть глубокими — до 3—4 мм; прижоги и шлифовочные трещины являются причиной дальнейшего разрушения точных рабочих поверхностей деталей станков и машин.

Дефекты термической обработки:

- термические трещины, возникающие в металле при резком нагреве и охлаждении при нарушении режимов термообработки для данного материала (например, при закаливании стальных деталей); эти трещины бывают различной величины и ориентирования, могут проникать глубоко в толщу материала; во многих случаях очень трудно различимы после обработки и вообще не различимы непосредственно после закалки;

- обезуглероживание — выгорание углерода в поверхностных слоях стальных заготовок при нагреве в атмосфере, содержащей пары воды, углекислый газ, водород;

интенсивное выгорание углерода приводит к понижению прочности стали; в деталях и изделиях из инструментальной стали (например, металлообрабатывающие инструменты), которые прокаливают на большую глубину, обезуглероживание приводит к появлению поверхностных трещин глубиной до 2 мм;

- науглероживание — насыщение поверхностных слоев углеродистых сталей избыточным углеродом при нагреве металла в атмосфере, содержащей слишком большое количество окиси углерода; науглероживание приводит к появлению дефектов, связанных с повышенной хрупкостью заготовок и склонностью к образованию мелких сетевидных трещин;

- водородные трещины — возникают в металле из-за насыщения поверхностного слоя водородом под действием щелочей и кислот, содержащихся в специальных растворах для травления и электрохимической обработки; насыщение поверхностного слоя водородом приводит к резкому падению пластичности и к хрупким разрушениям, очагами которых обычно становятся микротрещины, возникающие на поверхности заготовки.

- пережог вызывает не только образование крупного зерна, но и оплавление границ зерен стали, что в дальнейшем приводит к разрушению металла.

Дефекты неразъемных соединений металла:

- металлургические дефекты — все дефекты, присущие литому металлу, которые возникают при сварке (электро-, газоплазменной и т. п.): раковины, шлаковые включения, поры, а также изменения размеров зерна в зоне термического влияния, перегрев, закалка и отпуск, горячие и холодные трещины;

- трещины — зачастую возникают от внутренних напряжений усадки при охлаждении шва; трещины в наплавленном металле, перпендикулярные оси шва, могут распространяться и на основной металл свариваемых деталей; иногда трещины могут возникать и вдоль боковой стороны нагреваемой зоны;

- непровар — пустоты, образующиеся в результате плохой подготовки кромок свариваемых листов, малого расстояния между кромками по отношению к диаметру электрода; типичная картина непровара на рентгеновском снимке — непрерывная или прерывистая темная полоса в центре шва; непровар значительно снижает прочность шва по сравнению с расчетной и, как следствие, снижает надежность всей сварной конструкции;

- вогнутость на вершине шва, избыточное усиление толщины шва в отдельных местах, нахлест (наплавление металла на основу), проплав (прожог щели в основном металле или шве), неровности в местах смены электрода и др. Наружные дефекты в большинстве случаев могут быть определены визуально. Их число и размер во многих случаях зависят от мастерства сварщика или качества сварочной техники;

- непропай, непрочлей — дефекты, возникающие соответственно в паяных и клееных соединениях из-за недостаточной чистоты соединяемых поверхностей или нарушения температурного режима пайки и склеивания;

- отслоение — характерный дефект в изделиях, изготовляемых из многослойных материалов; возникает как в процессе изготовления двухслойных труб и листов, так и при их обработке давлением, сваркой.

Дефекты при нанесении покрытий:

- дефекты лакокрасочных покрытий — плохая адгезия (сцепляемость краски с поверхностью окрашиваемой детали) — результат грубых нарушений технологического

процесса окраски. Качественное проведение операций обезжиривания и грунтовки (подготовки поверхностей к окраске) во многом определяет качество и прочность окончательного слоя;

- изменение толщины слоя металлического покрытия, его сплошности, что может вызвать коррозию детали (окисление, ржавление). Качество гальванических покрытий (металлизация) всецело зависит от строгого соблюдения всех технологических требований: подготовки поверхностей деталей к металлизации, режимов температуры и времени выдержки в гальванических ваннах, поддержание электролитов в полном соответствии с рецептурами и т. д.

Шаржирование — насыщение поверхности материала абразивными материалами. Насыщение поверхности мягких материалов абразивными частицами в результате абразивной обработки приводит к нежелательным процессам в процессе эксплуатации. При работе таких деталей в условиях трения скольжения или трения качения с проскальзыванием наблюдается повышенный износ как сопряженной поверхности, так и шаржированной поверхности, в том числе и за счет вырывания абразивных зерен из шаржированной поверхности и попадания их в зону трения.

Отражательная способность — это величина, характеризующая способность поверхности тела или границы раздела двух сред отражать падающий на неё поток электромагнитного излучения. Количественная характеристика отражательной способности — коэффициент отражения. Отражательная способность зависит от угла падения и поляризации падающего излучения. Коэффициент отражения — это отношение потока излучения, отражённого телом, к упавшему на него потоку излучения. Для деталей машиностроения отражательная способность зачастую является характеристикой декоративной отделки детали и обеспечивает блеск поверхности. Отражательная способность зависит в первую очередь от таких характеристик шероховатости, как высота неровностей, радиус вершин и впадин неровностей, а также угол наклона неровностей.

2.5 Технологическое наследование и эксплуатационные свойства поверхности детали

Как уже указывалось, с течением времени структуры переходят в более устойчивое состояние термодинамического равновесия, при котором свободная энергия поверхностного слоя минимальна. Запасенная структурами внутренняя энергия уменьшается, а связанная энергия системы, представляемая произведением температуры на энтропию, возрастает. В результате часть поглощенной энергии упорядоченного воздействия переходит в энергию неупорядоченного процесса и в конечном итоге в теплоту. Таким образом, в поверхностном слое происходят необратимые процессы наследственности и самоорганизации, которые путем наложения и совместных действий, внесенных и трансформированных потоков энергии и вещества ведут к образованию комплексных структур. Управление процессами поглощения энергии и вещества, при послойном прохождении высокоинтенсивных воздействий, дает возможность синтезировать, создавать требуемые в эксплуатации структуры и «конструировать» поверхностные слои детали.

Сущность явления технологическо-эксплуатационной наследственности. При проектировании технологического процесса необходимо учитывать влияние результатов предшествующих операций и переходов технологического цикла на износостойкость,

прочность, надежность и долговечность деталей при эксплуатации. Это связано с существованием технологическо-эксплуатационной наследственности, влияющей на качество рабочих поверхностей деталей машин. Особенно ярко наследственность проявляется при комбинированных методах обработки, когда технологические факторы последовательно друг за другом или совместно параллельно воздействуют на обрабатываемую деталь. При этом наследственность влияет не только непосредственно после финишных операций технологического процесса, но может проявляться и при эксплуатации в результате воздействия не только эксплуатационных нагрузок, но и под влиянием тех или иных параметров качества поверхности, созданных в поверхностном слое детали при ее предшествующей обработке. С позиций технологическо-эксплуатационной наследственности можно установить связь технологических операций и переходов с износостойкостью, прочностью и другими эксплуатационными свойствами деталей машин

Под технологическо-эксплуатационной наследственностью в настоящее время подразумевается явление переноса свойств обрабатываемого объекта от предшествующих технологических операций и переходов, воздействующих как последовательно, так и параллельно, к последующим или при совместном действии операций и переходов, которое сказывается в дальнейшем при эксплуатации на параметрах качества деталей машин. При этом изменение свойств на стадиях эксплуатации определяется методами и режимами как отдельных операций и переходов, так последовательностью и сочетанием операций и переходов технологического процесса в целом

Для обеспечения надежности и долговечности деталей машин необходимо придавать их обработанным поверхностям оптимальные геометрические характеристики и физико-механические свойства. Однако на эксплуатационные свойства, помимо оговоренных чертежом детали точности изготовления, шероховатости рабочих поверхностей, марки материала, его структуры и твердости, влияют методы и режимы ее получения. Это объясняется тем, что точность и шероховатость не могут характеризовать физическое состояние поверхностного слоя металла. Поверхности с одинаковой точностью и конечной шероховатостью могут иметь различную степень наклепа, неодинаковый характер и величину остаточных напряжений, у них в разной степени может быть искажено кристаллическое строение и нарушена цельность поверхности за счет микротрещин, задиров, разрыхления и т.д. Различными могут быть химический состав и структура поверхностного слоя металла, если поверхность получена в результате выполнения комплекса физико-механических операций с выделением в технологической зоне значительного количества тепла, то отдельные химические составляющие могут выгорать, в результате чего снижаются эксплуатационные свойства металла.

Важной характеристикой эксплуатационных свойств обработанных поверхностей является поверхностная энергия. Физический смысл ее заключается в следующем. Внутренние частицы твердого тела окружены со всех сторон соседними частицами. Частицы, находящиеся на поверхности, окружены соседними не со всех сторон, поэтому они располагаются иначе, чем внутренние. В поверхностном слое сосредоточен больший запас потенциальной энергии, чем во внутренних слоях. Для перевода внутренних частиц на поверхность, то есть для образования новой поверхности, требуется затратить определенную работу. Работа, необходимая для образования новой поверхности, называется поверхностной энергией. Повышение плотности энергии у поверхности объясняется тем, что действующие на частицу внутри твердого тела молекулярные силы

со стороны соседних частиц взаимно компенсируются и составляют равнодействующую, равную нулю. В поверхностном слое такой компенсации нет, и на поверхностные молекулы и частицы действуют силы, направленные внутрь. Они компенсируются тем, что происходит сжатие поверхностного слоя, вызывающее повышение плотности энергии.

Чем выше микротвердость детали, тем больше ее поверхностная энергия. Но поскольку микротвердость поверхности на финишной операции или конечном переходе зависит от условий выполнения не только данных, но и предыдущих воздействий, то можно считать, что на конечное значение поверхностной энергии в определенной мере влияют предшествующие операции и переходы, то есть имеет место определенная взаимосвязь технологических воздействий. Очевидно, что поверхности с равной шероховатостью, но обработанные с применением различных технологических методов будут иметь различную величину поверхностной энергии, а следовательно, и разные эксплуатационные свойства. Основные эксплуатационные свойства поверхности, то есть ее микро- и макрогеометрия, микротвердость, напряженное состояние, поверхностная энергия, химический состав, структура тончайших наружных слоев металла и другие, формируются на протяжении всего периода обработки деталей. При этом отдельные свойства наследуются от одного перехода, операции, стадии, этапа к другим технологическим или эксплуатационным воздействиям. Следовательно, при механической, термической или других физико-технических обработках деталей имеет место технологически-эксплуатационная наследственность.

Рассмотрим влияние технологически-эксплуатационных барьеров на изменение параметров качества поверхностей. Представляет интерес изучение влияния отдельных переходов, операций на конечное состояние поверхностного слоя детали. В технологическом комплексе влияние первых операций и переходов обычно слабее, чем финишных, но все же ими пренебрегать нельзя. Сила воздействия каждого технологического фактора на конечные эксплуатационные свойства обработанных деталей неодинакова. Влияние одних распространяется вплоть до самой последней операции, влияние других ослабевает значительно раньше. Кроме того, некоторые факторы воздействуют только в пределах определенной операции, а на смежные влияния не оказывают. Так, например, волнистость и огранка поверхности могут частично копироваться на одной-двух смежных операциях, а затем их влияние прекращается.

В технологической цепочке и при эксплуатации существуют своеобразные барьеры. Некоторые факторы не могут их преодолеть и в таком случае эти факторы не влияют на конечные свойства обработанных поверхностей. Другие факторы барьеры проходят, но при этом значительно теряют свою исходную силу и влияют на конечные свойства очень слабо. Самыми существенными барьерами в технологическом процессе являются термические операции (например, закалка, отжиг, отпуск) и так называемые упрочняющие операции, сопровождающиеся поверхностным упрочнением деталей (например, обкатка шариками, роликами, дорнование отверстий, алмазное выглаживание). Сюда же можно отнести и процесс выхаживания при шлифовании, способствующий появлению абразивного наклепа обрабатываемой поверхности.

Основной эффект операций поверхностного упрочнения на ослабление воздействия отрицательных факторов технологической наследственности состоит в том, что значительное количество микротрещин, находящихся в поверхностном слое металла, при пластической деформации смыкается и поверхность становится более цельной залечивается. Кроме того, поверхностный наклеп выравнивает физико-механические

свойства различных участков поверхности, устраняя повышенные напряжения, возникающие на границах участков с различной структурой и микротвердостью. В этих местах во время эксплуатации детали могут образоваться микротрещины, а затем и питтинги. Поверхностный наклеп при осуществлении упрочняющих операций выравнивает структурные неоднородности, устраняя концентраторы напряжений. Это происходит в результате того, что при обработке мягких структур наклеп происходит интенсивнее, чем твердых, поэтому их микротвердость при этом выравнивается. Кроме того, местные растягивающие напряжения подавляются вновь созданными при наклепе сжимающими напряжениями, и весь поверхностный слой металла становится равнонапряженным. Остаточные напряжения в конце упрочняющей операции будут сжимающими. Поэтому влияние многих отрицательных факторов технологической наследственности при осуществлении упрочняющих воздействий резко ослабевает или вообще не наблюдается.

Тепловые явления при механической обработке обычно ухудшают физико-химическое состояние поверхностного слоя, тем самым снижая работоспособность деталей. Структурные превращения в поверхностном слое могут располагаться на глубине, превышающей величину припуска на последующую операцию. Эти превращения обычно оказывают отрицательное влияние на формирование эксплуатационных характеристик поверхности при дальнейшей обработке. Поэтому, ослабляя термические воздействия на деталь, управляя тепловыми процессами, можно снизить действие отрицательных факторов технологической наследственности.

Таким образом, как положительные, так и отрицательные факторы появляются и угасают на различных операциях технологического процесса и стадиях эксплуатации деталей машин, то есть продолжительность действия отдельных факторов технологическо-эксплуатационной наследственности различна. Конечные свойства обработанной поверхности будут зависеть от того, сколько отрицательных факторов пройдет через весь комплекс операций и переходов вплоть до создания готовой детали и насколько они будут нейтрализованы, положительными факторами. Следовательно, при проектировании технологических процессов обработки необходимо вводить такие операции, использовать такие воздействия, которые препятствовали бы действию отрицательных факторов на финишной операции.

3.1, 3.2 Технологическое обеспечение геометрических показателей качества поверхностного слоя деталей машин при лезвийной и абразивной обработке.

При лезвийной обработке (точении, фрезеровании, сверлении и др.) формируется не только микрорельеф поверхности (шероховатость, волнистость), но и под действием различных факторов (теплого эффекта, пластической деформации в зоне резания и др.) изменяются такие параметры, как микротвердость, остаточные напряжения и др. При этом шероховатость поверхности является управляемым параметром, а остальные характеристики формируются как неуправляемые параметры и являются скорее ограничивающими условиями при назначении режима обработки, геометрии инструмента и др.

Шероховатость поверхности. Шероховатость после механической обработки - это след режущего инструмента (металлического или абразивного), искаженный пластической и упругой деформацией, а также вибрацией технологической системы (рис. 3.1).

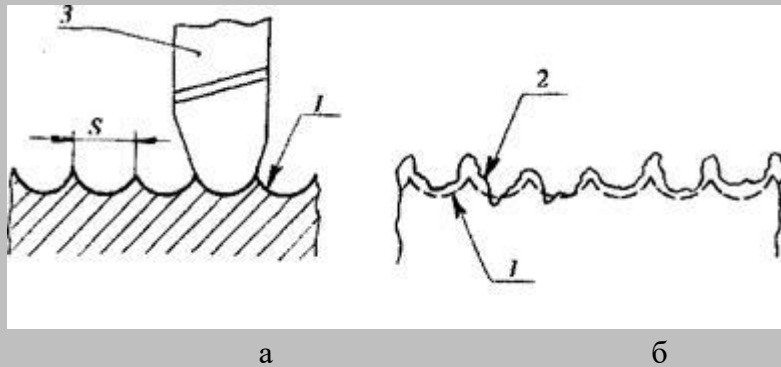


Рис. 3.1. Схема образования неровностей на поверхности, обработанной лезвийным инструментом а - образование закономерного (регулярного) поперечного профиля поверхности; б - искажение профиля пластической деформацией при отделении стружки; 1,2 - соответственно закономерный и искаженный профили поверхности; 3 - резец; S - шаг неровностей – подача.

Причинами, обуславливающими видоизменение и искажение (трансформацию) основного геометрического профиля, являются также копирование микронеровностей рабочих кромок резца или абразивных зерен и образование зубцов нароста, приставших к поверхности детали, упругое поднятие материала детали после прохода режущего инструмента и другие технологические факторы, определяющие условия механической обработки (зазоры во вращающихся деталях станка, несбалансированность их и др.).

Например, чем меньше подача при токарной обработке и больше радиус закругления резца, тем чище поверхность и, соответственно, меньше шероховатость. Для расчета теоретической высоты гребешков при токарной обработке существует определенная зависимость. Но расчетная высота не является действительной высотой гребешка, так как не учитывается образование нароста на режущей кромке резца. Высота гребешка будет выше. Ее максимальная величина достигает при определенной температуре, дальше с ростом температуры идет уменьшение высоты гребешка и при некоторой температуре нарост на режущей кромке полностью исчезает.

Геометрия неровностей тесно связана с физико-механическими процессами разрушения металла при обработке резанием. Так, шероховатость поверхности при обработке хрупких металлов представляется в виде треугольных углублений, отвечающих форме вырванных зерен; в вязких металлах при больших скоростях резания сильно деформированные неровности имеют форму чешуек. Режущий инструмент разрушает на своем пути разнообразно расположенные зерна металла; некоторые из них, имея соответствующую ориентацию, срезаются, другие разрушаются отрывом с образованием мельчайших трещин.

Величина шероховатости обрабатываемой поверхности зависит от вида обработки, рода обрабатываемого материала, степени пластической деформации его при резании, режима резания, геометрии режущего инструмента, охлаждения и других факторов.

Основными технологическими факторами, определяющими шероховатость поверхности, являются:

- подача, скорость и глубина резания, радиус закругления вершины резца при обработке резанием металлическим инструментом;

- зернистость шлифовального круга, продольная и поперечная подача, скорость вращения круга и детали при обработке абразивным инструментом.
- подача, скорость вращения детали, глубина натяга, радиус индентора при обработке деформирующим инструментом.

Технологическое обеспечение шероховатости поверхности базируется в основном на экспериментальном изучении зависимостей между методом окончательной обработки и параметрами шероховатости.

Таблица 3.1. Шероховатость поверхности при различных методах обработки

Обработка	Параметры шероховатости			
	Ra, мкм	Sm, мм	S, мм	t ₂₀ , %
Наружные поверхности вращения				
Обтачивание:				
черновое	12,5-50	0,32-0,25	0,32-1,25	10-15
получистовое	3,2-12,5	0,160-0,40	0,160-0,40	10-15
чистовое	0,8-2,5	0,080-0,160	0,050-0,160	10-15
тонкое	0,1-0,8	0,020-0,100	0,010-0,100	10-15
Шлифование:				
предварительное	1-2,5	0,063-0,20	0,032-0,160	10
чистовое	0,2-1,25	0,025-0,100	0,010-0,080	10
тонкое	0,05-0,25	0,008-0,025	0,003-0,160	40
Суперфиниширование	0,032-0,28	0,06-0,020	0,003-0,016	10
Полирование	0,008 -0,08	0,008-0,025	0,002-0,08	10
Притирка	0,01-0,11	0,006-0,04	0,002-0,032	10-15
Обкатывание и выглаживание	0,03-2,0	0,025-1,25	0,025-1,25	10-70
Виброобкатывание	0,063-1,60	0,01-10,5	0,008-0,16	10-70
Электрохимическая	0,02-1,60	0,025-1,25	0,025-1,25	10-70
Магнитно-абразивная	0,02-1,60	0,008 -1,25	0,03-0,16	10-30
Внутренние поверхности вращения				
Сверление и рассверливание	3,2-12,5	0,16-0,8	0,08-0,63	10-15
Зенкерование:				
черновое	3,2-6,3	0,16-0,8	0,063-0,4	10-15
чистовое	1,25-3,2	0,08-0,25	0,05-0,16	10-15
Развертывание: черновое	1,25-2,5	0,08-0,2	0,04-0,16	10-15
чистовое	0,63-1,25	0,032-0,1	0,0125-0,063	10-15
тонкое	0,32-0,63	0,0125-0,04	0,008-0,02	10-15
Протягивание:				
черновое	1,25-3,2	0,08-0,25	0,04-0,2	10-15
чистовое	0,32-1,25	0,02-0,1	0,008-0,08	10-15
Растачивание:				
черновое	6,3-12,5	0,25-1	0,25 - 1	10-15
получистовое	1,6-6,3	0,125-0,32	0,125-0,32	10-15
чистовое	0,8-2,0	0,08-0,16	0,05-0,16	10-15

тонкое	0,2-0,8	0,02-0,1	0,01-0,1	10-15
Шлифование:				
предварительное	1,6-3,2	0,063-0,25	0,032-0,16	10
чистовое	0,32-1,60	0,25-0,1	0,1-0,8	10
тонкое	0,08-0,32	0,008-0,025	0,003-0,016	10
Хонингование:				
предварительное	1.25-3,2	0,063-0,25	0,085-0,16	10
чистовое	0.25-1,25	0,02-0,1	0,008-0,08	10
тонкое	0.04-0,25	0,006-0,2	0,003-0,16	10
Притирка	0,02-0,16	0,005-0,04	0,002-0,02	10-15
Раскатывание и выглаживание	0,05-2	0,025-1	0,025-1	10-70
Виброраскатывание	0,063-1.6	0,01-12,5	0,008-0,16	10-70
Калибрование	0,1-1,6	0,025-1	0,025-1	10-70
Плоские поверхности				
Торцовое фрезерование:				
черновое	3,2-12,5	0,16-0,4	0,16-0,4	10-15
чистовое	1-4	0,08-0,2	0,063-0,2	10-15
тонкое	0,32-1,25	0,025-0,1	0,016-0,08	10-15
Цилиндрическое фрезерование:				
черновое	3,2-12,5	1,25-5	1,25-5	10
чистовое	0,8-3,2	0,5-2	0,5-2	10
тонкое	0,2-1	0,16-0,63	0,1-0,63	10-15
Строгание:				
черновое	6,3-50	0,2-1,6	0,2-1,6	10-15
чистовое	1-6,3	0,08-0,25	0,063-0,25	10-15
тонкое	0,32-1,6	0,025-0,125	0,0125-0,1	10-15
Торцовое точение:				
черновое	25-50	0,2-1,25	0,20-1,25	10-15
чистовое	1,6-6,3	0,08-0,25	0,063-0,25	10-15
тонкое	0,32-1.6	0,025-0,125	0,0125-0,1	10-15
Протягивание:				
черновое	1-3,2	0,16-2	0,16-2	10-15
чистовое	0,32-1,25	0,05-0,5	0,032-0,5	10-15
Шлифование:				
предварительное	1,6-4	0,1-0.32	0,063-0,25	10
чистовое	0,32-1,6	0,025-0,125	0,0125-0,08	10
тонкое	0,08-0,32	0,01-0,032	0,005-0,025	10
Шабрение от себя:				
$Z=20 \div 10$	1,6-6,3	0,2-1	0,125-1	10-15
$Z=30 \div 20$	0,63-2,5	0,063-0,25	0,032-0,2	10-15
Шабрение на себя:				
$A_c = 40 \div 60\%$	0,032-1,00	0,040-0.125	0,02-0,1	10-15
$A_c = 60 \div 80\%$	0,1-0,4	0,016-0,05	0,008-0,032	10-15

Накатывание роликами и шариковыми головками	0,1-2	0,025-5	0,02-5	10-70
Вибронакатывание	0.16-2,5	0,025-12,5	0,02-5	10-70
Виброполирование	0,3-0,032	0,1-0,025	0,004-0.025	10
Притирка	0,02-0,1	0,008-0,04	0,004-0,032	10-15
Боковые поверхности шлицев				
Шлицефрезерование: Предварительное чистовое	6,3-12,5	1-5	1-5	10-15
	1,25-4	0,1-2	0,05-2	10-15
Шлицестрогание	1-2,5	0,08-2,5	0,05-2,5	10-15
Шлицепротягивание	0,8-1,6	0,08-2	0,05-2	10-15
Шлифование: предварительное окончательное	1,6-3,2	0,1-0,32	0,063-0,25	10
	0,4-1,25	0,032-0,1	0,016-0,063	10
Накатывание шлицев	0,8-1	0,08-5	0,063-5	10-15
Обкатывание шлицев	0,32- 1	0,063-2	0,032-1,25	10-70
Боковые поверхности зубьев				
Зубонарезание фрезами: модульными червячными	6,3-12,5	1,25-5	1-5	10-15
	3,2-6,3	0,32-1,6	0,2-1,6	10-15
Зубонарезание долбьяками	1,6-3,2	0,2-1,25	0,125-1,25	10-15
Протягивание	0,8-1,6	0,08-2	0,05 - 2	10-15
Накатывание	0,8-2	0,08-5	0.063 - 5	10-15
Шевингование	0.63-1.25	0,125-0,5	0,08-0,5	10-15
Шлифование	0,5-1,25	0,04-0,1	0,025-0,063	10
Обкатывание	0,32-1	0,063-2	0,032-1,75	10-70
Притирка	0,1-0,5	0,032-0,5	0,02-0,16	10-70
Боковые поверхности профиля резьбы				
Нарезание: резцами и гребенками метчиками, плашками и саморас- крывающимися нарезными головками	1,6-3,2	0,08-0,25	0,32-0,16	15-20
	1,6-3,2	0,063-0,2	0,025-0,125	10-15
Фрезерование: предварительное окончательное	1,6-3,2	0,125-0,32	0,063-0,2	10
	0,5-2	0,032-0,125	0,016-0,8	10
Накатывание и раскатывание резьбы	0,5- 1,25	0,04-0,1	0,032-0,08	10-20

Примечания:

1. Для упрочняющей обработки $R_{max} = 5R_a$; $R_z = 4R_a$; для точения, строгания и фрезерования $R_{max} = 6R_a$; $R_z = 5R_a$, для остальных методов обработки $R_{max} = 7R_a$; $R_z = 5,5R_a$.

2. Z — число пятен при шабрении на площади $25 \times 25 \text{ мм}^2$; A_c - контурная площадь касания при шабрении.

Таблица 3.2. Геометрические параметры шероховатости поверхности деталей (при обработке резанием)

Метод обработки	Ra, мкм	v	b	г _п	г _{пр}	г	β _п	β _{пр}	S _п / R _{max}	S _{пр} / R _{max}	r/ R _{max}
	мкм										
Стальные детали											
Плоское шлифование	5	2,4	2,5	5	250	35	35°	2°0	3	57	2
	2,5	2,25	2,75	7	1300	100	25°	1°	4,5	135	10
	1,25	2,2	2,85	10	3200	180	15°	30'	8,5	230	30
	0,63	2,1	3	17	8000	370	10°	18'	14	270	120
	0,32	2	3,5	20	15000	550	7°	10'	19	780	350
Торцовое фрезерование	5	1,65	1,8	45	4000	425	20°	50'	7	137	20
	2,5	1.6	2,3	90	9000	900	11°	30'	16	230	90
	1,25	1,6	2,5	120	15000	1350	5°	15'	25	445	200
Внутреннее шлифование	2,5	2	1,9	3.5	8	5	32°	13°	3,5	9	0,5
	1,25	1,95	2	6	11	8	17°	11°	7	10	1,3
	0,63	1,85	2,5	10	16	13	10°	8°	13	15	4
	0,32	1,75	3	15	23	18,5	5°	5°	23	22	12
Круглое шлифование	1,25	2,6	2,3	4	16	8	25°	10°	5	8	1,3
	0,63	2,4	2,6	6,5	22	12	16°	8°	8	15	4
	0,32	2,3	2,8	12	30	20	10°	7°	15	19	12
	0,16	2,2	3,5	18	40	30	5°	4°	22	34	35
Шабрение	0,63	2,2	4	10	25	16	9°	6°	-	-	6
Развертывание	2,5	1,7	2	10	20	15	20°	5°	6,5	12	1,5
	1,25	1,6	2,3	30	50	40	10°	3°	12	39	6
	0,63	1,5	2,5	250	350	300	2°	2°	53	57	90
	0,32	1,4	2,8	500	500	500	1°30'	1°30'	90	90	300
Полирование	0,63	2,2	3	350	150	230	2°	2°	60	72	70
	0,32	1,7	3,25	700	300	450	1°	1°	120	105	300
	0,16	1,3	3,5	1000	450	670	30'	30'	215	180	850
Строгание	10	1,95	2,2	17	150	50	20°	2°30'	5,7	32	1,3
	5	1,9	2,5	30	250	90	15°	2°	8	50	4,5
	2,5	1,6	2,7	90	600	230	10°	1°30'	16	90	24
	1,25	1,5	2,65	160	450	400	6°	1°	23	120	60
Цилиндрическое фрезерование	10	1,8	1,3	10	45	20	25°	8°	4,5	14	0,5
	5	1,6	1.7	15	60	30	20°	7°	6	16	1,5
	2,5	1,5	1,8	25	80	45	15°	6°	9,5	20	4,5
	1,25	1,45	2	50	120	80	9°	4°	1,5	35	12
Точение	5	1,5	1	20	60	35	20°	10°	6	12	1,75
	2,5	1,45	1.5	30	80	50	15°	8°	8	14,5	5
	1,25	1,35	2	60	90	75	10°	7°	14	18	12
	0,63	1,3	2,1	120	120	120	5°	5°	25	24	37
Протягивание	1,25	1,75	1,2	12	9000	330	10°	12'	12	600	50

	0,63	1,7	1,8	25	12000	550	6°	10'	20	690	170
	0,32	1,65	2,2	70	15000	1000	3°	8'	48	750	650
Хонингование	0,63	2,2	1,5	4	60	15	13°	4°	9	31	5
	0,32	2,1	2,2	5,5	70	20	10°	3°	12	43	12
	0,16	2	3	14	90	35	5°	2°	26	62	45
	0,08	1,9	4	20	160	70	3°	1°30'	45	105	175
Растачивание	5	1,65	1,5	20	50	32	18°	11°	7,5	10,5	1,6
	2,5	1,6	1,6	35	65	50	13°	9°	10	13	5
	1,26	1,45	2	60	85	70	8°	7°	16	18	11
	0,63	1,4	2,5	110	120	115	5°	5°	30	25	36
Доводка цилиндрических поверхностей	0,16	2,3	1,9	25	35	30	6°	3°	25	50	35
	0,08	2,2	2	40	40	40	3°	2°30'	50	57	100
	0,04	2	2,1	70	43	55	1°	2°	110	85	275
	0,02	1,5	2,5	125	45	75	30'	1°30'	200	125	750
Доводка плоскостей	0,16	3	1,5	15	7000	300	5°	10'	25	770	400
	0,08	2,5	2,2	25	10000	500	3°	7'	47	1050	1250
	0,04	2,3	2,5	75	14000	1000	1°	5'	125	1500	5000
	0,02	2,2	3	250	35000	3000	20'	2'	275	3550	30000
Чугунные детали											
Строгание	10	2,1	2	8,5	40	18,5	35°	18°	3	9	0,45
	5	2	2,3	10	70	25	20°	10°	58	13	1,3
	2,5	1,8	4	20	500	100	10°	3°30'	11,7	58	10
	1,25	1,7	4,2	30	900	150	5°	1°30'	25	82	25
Плоское шлифование	2,5	2	2	15	250	60	27°	3°	4,7	40	6
	1,25	1,97	2,5	20	550	100	12°	1°	10,5	112	15
	0,63	1,95	3,8	35	1200	200	6°	30'	21	226	65
	0,32	1,8	4,5	40	1700	250	4°	20'	35	340	160
Цилиндрическое фрезерование	10	1,95	1,6	7	40	17	37°	11°	2,9	10,5	0,4
	5	1,9	2	8	50	20	32°	9°	3,8	13	1
	2,5	1,8	2,3	8,5	70	25	25°	7°	48	18	2,5
	1,25	1,65	2,5	13	180	50	15°	3°	8,5	45	8
Торцовое фрезерование	10	—	—	13	45	25	35°	9°	3,3	13,5	0,6
	5	1,5	1,1	20	75	40	20°	6°	8	19,5	2
	2,5	1,4	1,4	30	110	60	10°	3°	12	39	6
	1,25	1,35	1,5	45	170	90	5°	2°	22	69	15
Внутреннее шлифование	2,5	2,2	2,5	7	19	12	33°	18°	3,7	6,7	1,2
	1,25	2,1	2,8	12	22	16	18°	13°	7	10	2,5
	0,63	1,9	3,5	20	34	25	3°30'	7°	18	18	8
	0,32	1,85	3,75	35	57	45	3°	3°	40	45	30
Точение	10	1,9	1,1	15	40	25	30°	11°	3,8	10,5	0,6
	5	1,8	1,3	20	70	37,5	20°	8°	7	14,5	1,3
	2,5	1,7	2	30	120	60	10°	5°	12	18	2,5
	1,25	1,7	2,5	60	270	130	5°	3°	30	42	6

Растачивание	5	2	2	10	13	12	30°	20°	4	6	0,6
	2,5	1,9	2,7	12	14	13	25°	13°	5	9	1,3
	1,25	1,8	2,9	15	16	15	20°	10°	7	11	2,5
	0,63	1,75	2,5	20	20	20	10°	4°30'	12	19	6
Круглое шлифование	2,5	1,9	1,5	13	200	50	18°	4°	6,6	31	5
	1,25	1,75	2,5	18	400	85	12°	2°	10	60	13,5
	0,63	1,7	2,75	23	1000	150	8°	1°	16	178	50
	0,32	1,6	3	25	1400	190	6°	30'	22	235	120
Доводка цилиндрических поверхностей	0,16	1,3	2	25	8	15	4°	7°	33	18,5	17,5
	0,08	1,2	2,3	35	13	20	3°	4°	50	32	55
	0,04	1,1	2,4	50	30	40	1°30'	2°	85	80	200
	0,02	1,05	3	70	45	55	50'	1°	230	145	550
Шабрение	0,63	2	1,85	10	35	18,5	9°	4°	-	-	10

Примечание. Параметры b и v относительной опорной длины профиля t_p входят в зависимость $t_p = b(p/R_{\max})^v$ при $0 \leq p/R_{\max} \leq 0,4$; $r_{пр}$, $r_{п}$ – радиусы закругления вершин микронеровностей соответственно в продольном и поперечном направлениях; $\beta_{пр}$, $\beta_{п}$ – углы профиля микронеровностей соответственно в продольном и поперечном направлениях.

Таблица 3.3. Параметры поперечной волнистости

Метод обработки	Wz, мкм	Sw, мкм	Sw/Wz	Sn/Rz	rw _п , мм
Шлифование: внутреннее	0,6-4,5	500-1400	100-1350	3,4-24	10-80
	1-3	450-1400	120-450	3,5-18	5-400
круглое	0,75-3	250-500	165-400	4,8-24	10-25
	0,5-7,5	550-1000	80-1850	6,5-22	10-100
плоское	1,25-13	750-1400	100-700	3-20	15-50
	0,8-4	500-900	200-800	4,5-35	20-80
Растачивание	2-3,5	1000-1500	300-750	7,5-730	15-55
	0,5-10	400-1000	40-850	4-13	5-50
Строгание	2-6	400-1700	200-350	5,7-25	10-30
	-	-	-	-	-
Хонингование	0,1-0,8	150-700	200-7000	9-45	2,5-40
	-	-	-	-	-
Развертывание	0,5-4	300-500	100-1000	6,5-90	5-50
	-	-	-	-	-
Полирование	0,3-1,5	150-350	200-500	60-220	10-25
	-	-	-	-	-
Доводка плоских поверхностей:	0,1-0,35	60-100	300-600	45-125	5-10
	-	-	-	-	-
цилиндрических	0,05-0,15	35-120	400-700	25-200	2,5-10
	-	-	-	-	-
Растачивание	-	-	-	-	-

	0,5-10	400-1000	40-850	4-13	5-50
Торцовое фрезерование	-	-	-	-	-
	2,5	800	300	22	85
Точение	-	-	-	-	-
	1	1000	1000	30	50

Примечание. В числителе приведены параметры, полученные при обработке стальных деталей, в знаменателе - при обработке чугунных деталей.

Таблица 3.4. Параметры продольной волнистости

Вид обработки	$W_{z_{пр}}, \text{мкм}$	$Sw_{пр}, \text{мм}$	$Sw_{пр}/W_{z_{пр}}$	$S_{пр}/R_{пр}$	$rw_{пр}, \text{мм}$
Плоское шлифование	1,2-12	2,4-3,5	280-2900	60-800	30-350
	1,3-9	1,8-2,3	200-1770	42-340	40-200
Строгание	1-12	1-5	320-1000	30-128	40-100
	12	1,65	140	9,5	20
Цилиндрическое фрезерование	7,5-40	1,7-3,4	60-270	14,5-20	5-45
	7,5-30	1,6-2,5	83-267	10,5-45	10-60
Протягивание	0,4-3	0,7-0,9	300-1750	12-50	20-80
	-	-	-	-	-
Доводка плоских поверхностей	0,25-0,5	1-1,5	2000-6000	750-1000	150-850
	-	-	-	-	-

Примечание. В числителе приведены данные, полученные при обработке стальных деталей, в знаменателе — при обработке чугунных деталей

Достигаемая при определенном методе обработки шероховатость прежде всего характеризуется высотными методами R_a , R_z или R_{max} . Однако поверхности с одинаковой высотой неровностей, но полученные различными технологическими методами, могут иметь различные эксплуатационные свойства, например по-разному сопротивляться действию сил, стремящихся деформировать выступы. Такие поверхности прежде всего могут различаться опорными (несущими) площадями (длинами). Оценка по опорной длине профиля не дает достаточно полного представления об опорной площади, так как шероховатость поверхности в поперечном и продольном направлениях различна и не связана постоянным соотношением. Поэтому для полной оценки несущих площадей нужна топография поверхности.

С уменьшением высоты поперечных микронеровностей высота продольной и поперечной шероховатостей становится примерно одинаковой. Наибольшее различие наблюдается при грубой обработке, когда продольная высота составляет малую долю от поперечной. Указанное различие зависит не только от вида обработки, но и от материала. Продольные неровности при обработке стальных деталей имеют наибольшее значение, например, при плоском и круглом шлифовании периферией круга, а при обработке чугунных деталей — при строгании, цилиндрическом фрезеровании, доводке цилиндрических поверхностей.

В некоторых случаях при механической обработке продольная шероховатость может превышать поперечную (например, при резании с образованием нароста на режущей кромке инструмента); наличие или отсутствие вибрации также заметнее

сказывается на продольной шероховатости, чем на поперечной. Следовательно, при оценке опорной площади необходимо учитывать отличия шероховатости в различных направлениях (микротопографию поверхности).

Абсолютные значения опорной площади поверхностей зависят не только от шероховатости, но и от метода обработки. Поверхность с малой шероховатостью по сравнению с поверхностью с более высокой шероховатостью, но полученной другим методом обработки, не всегда имеет большую опорную площадь. Поэтому для обеспечения определенной опорной (несущей) площади данной детали необходимо наряду с назначением высотного параметра шероховатости указывать технологический метод получения поверхности и этап обработки (рис. 3.2).

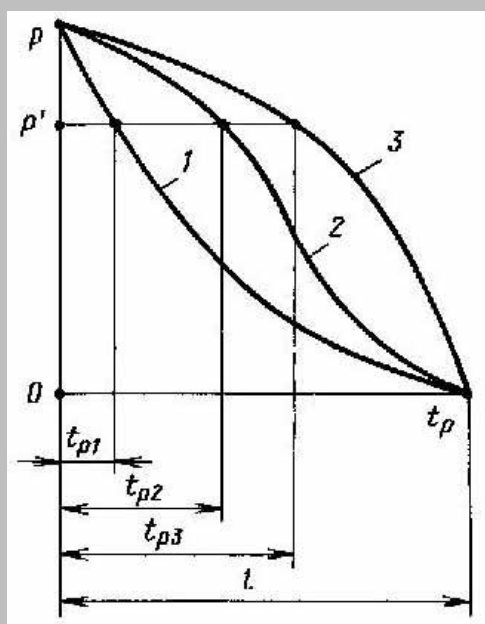


Рис. 3.2. Кривые относительных опорных длин профилей t_p при одинаковых уровнях сечения r : 1 — при черновой обработке; 2 — при чистовой обработке; 3 — при обработке поверхностным пластическим деформированием (ППД)

Наибольший практический интерес представляет начальная часть опорной кривой профиля, которая описывается формулой

$$t_p = b \cdot \varepsilon^v \quad (3.1)$$

где b и v — параметры аппроксимации начальной части опорной кривой профиля.

Эта формула справедлива в пределах $0 < t_p \leq 0,5$. Параметры b и v могут быть определены несколькими методами: графически, что требует построения опорной кривой профиля, и аналитически по соответствующим зависимостям. Изучение верхних участков шероховатых поверхностей позволило установить значения параметров b и v , характеризующих начальную часть опорных кривых (опорную площадь). Для основных технологических методов обработки они позволяют выполнить ориентировочные расчеты для определения опорной площади шероховатых поверхностей, обработанных резанием.

Таблица 3.5. Параметры шероховатости при различных методах обработки

Обработка	Формула	Условия обработки
Наружные поверхности		

Точение: получистовое, чистовое	$R_a = k_0 \frac{s^{k_1} (90^\circ + \gamma)^{k_4}}{p^{k_2} v^{k_4}} ;$	$s = 0,05 \div 0,43 \text{ мм/об}; v = 71 \div 282 \text{ м/мин}; p = 0,5 \div 2 \text{ мм}; \gamma = +4^\circ \div (-40^\circ)$. Коэффициенты $k_0 - k_4$ приведены в табл. 6 [24]
тонкое (алмазное)	$R_a = k_0 \frac{s^{k_1} (90^\circ + \gamma)^{k_4}}{p^{k_2} v^{k_4}} ;$ $R_p = k_0 \frac{s^{k_1} (90^\circ + \gamma)^{k_4}}{p^{k_2} v^{k_4}} ;$ $S_m = k_0 \frac{s^{k_1} (90^\circ + \gamma)^{k_4}}{p^{k_2} v^{k_4}} ;$ $t_p = 50 \left(\frac{0,005 R_a p}{R_p} \right)^{\left(\frac{R_p}{R_a} - 1 \right)} .$	$s = 0,05 \div 0,5 \text{ мм/об}; v = 50 \div 150 \text{ м/мин}; p = 0,5 \div 2 \text{ мм}; \gamma = +4^\circ \div (-40^\circ)$. Коэффициенты $k_0 - k_4$ приведены в табл. 7 [24]
Шлифование: круглое предварительное и получистовое	$R_a = 0,47 \frac{s_{np}^{0,35} i^{0,29} k^{0,08} j_{cm}^{0,34}}{v_\delta^{0,06} s_{pad}^{0,03} i^{0,024}} ;$ $R_p = 1,08 \frac{s_{np}^{0,16} s_{pad}^{0,03} i^{0,008} H^{0,7} K^{0,03}}{v_\delta^{0,18}} \left(\frac{j_{cm}}{10} \right)^{0,24} ;$ $S_m = 0,017 \frac{s_{np}^{0,34} i^{0,04} H^{0,25} K^{0,055}}{v_\delta^{0,22} s_{pad}^{0,15}} \left(\frac{j_{cm}}{10} \right)^{0,13} .$	Обрабатываемый материал – сталь 40X, HRC 30-35; $v_d = 20 \div 50 \text{ м/мин}$; $s_{np} = (0,5 \div 1) \text{ В}$, $S_{рад} = 0,05 \div 0,1 \text{ мм/дв.ход}$; $i = 1 \div 5$, $K = 16 \div 40$, для связи С2 $H = 2$; для СМ1 $H = 1$; $i_{ст} = 10000 \div 30000 \text{ Н/мм}$
тонкое (торцом ча- шечного алмазного круга)	$R_a = 0,03 s_{np}^{0,45} K^{0,85} \left(\frac{P}{10} \right)^{0,27} ;$ $R_p = 0,02 s_{np} K^{0,6} \left(\frac{P}{10} \right)^{0,2}$	$s_{np} = 0,15 \div 1,5 \text{ мм/об}$; $K = 28/20 \div 125/100$; $P = 20 \div 140 \text{ Н}$
Суперфиниши- рование (алмазными брусками)	$R_a = 0,0003 \left(\frac{P}{10^5} \right)^{0,15} \frac{K^{1,7}}{v_\delta^{0,2} t^{0,35}} ;$ $R_p = 0,0006 \left(\frac{P}{10^5} \right)^{0,17} \frac{K^{1,8}}{v_\delta^{0,2} t^{0,35}}$	$p = (3 \div 13) 10^5 \text{ Па}$; $v_d = 10 \div 50 \text{ м/мин}$; $\tau = 10 \div 80 \text{ с}$. Параметры шероховатости приведены в табл. 8 [24]
Полирование лентами: «конечной» длины	$R_a(R_z, R_p) = k_0 \frac{Ra_{уст}^{k_1} K^{k_2} (10^5)^{k_4}}{p^{k_4} v_\delta^{k_4} t^{k_4}} ;$ $S_m = 1 / (k_0 + k_1 Ra_{уст} + k_2 K +$ $+ k_3 \frac{P}{10^5} + k_4 v_\delta + k_5 t)$	$Ra_{исх} = 0,32 \div 0,80 \text{ мкм}$; $K = 63/50 \div 80/63$; $p = (1 \div 6) 10^5 \text{ Па}$; $v_d = 9,4 \div 36,4 \text{ м/мин}$; $\tau = 25 \div 60 \text{ с}$, коэффициенты $k_0 - k_5$ приведены в табл. 9 [24]

«бесконечной» длины	$R_a = 0,004 \left(\frac{P}{10} \right)^{0,46} \frac{K^{1,26}}{\tau^{0,61}} ;$ $R_p = 0,013 \left(\frac{P}{10} \right)^{0,25} \frac{K^{1,15}}{\tau^{0,47}} ;$ $R_{\max} = 0,026 \left(\frac{P}{10} \right)^{0,34} \frac{K^{1,33}}{\tau^{0,62}}$	<p>$K = 40/28 \div 125/100$; $P = 20 \div 70$ Н; $\tau = 10 \div 70$ с.</p> <p>Параметры шероховатости приведены в табл. 10 [24]</p>
Притирка	$R_a = 0,4 \frac{Ra_{\text{исх}}^{0,36} K^{0,79} v^{0,1}}{a^{0,2} \tau^{0,27}} ;$ $R_z = 1,13 \frac{Ra_{\text{исх}}^{0,32} K^{0,74} v^{0,06}}{a^{0,11} \tau^{0,35}} ;$ $R_p = 0,08 \frac{Ra_{\text{исх}}^{0,22} K^{0,72} v^{0,15} a^{0,06}}{\tau^{0,15}} ;$ $S = 0,069 \frac{v^{0,19}}{K^{0,42} a^{0,07} \tau^{0,2}}$	<p>Обрабатываемый материал – сталь У10А, HRC 60-65; $Ra_{\text{исх}} = 0,17 \div 0,89$ мкм; $v_d = 40 \div 150$ м/мин; $K = \text{АСМ } 2/3$; $\text{АСМ } 10/7$; $\tau = 120 \div 300$ с; $\alpha = 10 \div 25^\circ$</p>
Обкатывание роликами	$R_a(v, b) = k_0 v^{k_1} s^{k_2} p^{k_3} \gamma^{k_4} p_p^{k_5} D^{k_6} s_n^{k_7} v_n^{k_8}$	<p>Коэффициенты $k_0 - k_9$ приведены в табл. 11 [24]</p>
шариками	$R_a = Rz_{\text{исх}}^{0,95} \sigma_{\max}^{-0,24} D^{-0,13} s^{0,14} v^{0,04} ;$ $v = 0,21 v_{\text{исх}}^{4,8} \sigma_{\max}^{-0,03} D^{-0,03} s^{0,03} v^{0,02} ;$ $b = 0,24 v_{\text{исх}}^{0,61} \sigma_{\max}^{0,28} D^{0,3} s^{-0,18} v^{-0,03}$	<p>Обрабатываемый материал – сталь ШХ15, HRC 62÷63; $D = 3 \div 5$ мм; $s = 0,03 \div 0,11$ мм/об; $v = 10 \div 70$ м/мин $\sigma_{\max} = (5000 \div 9000)$ МПа</p>
Алмазное выглаживание	$R_a = 1,1 Rz_{\text{исх}}^{0,77} \sigma_{\max}^{-0,27} D^{-0,3} s^{0,14} v^{0,05} ;$ $v = 0,58 v_{\text{исх}}^{2,6} \sigma_{\max}^{-0,04} D^{-0,04} s^{0,04} v^{0,01} ;$ $b = 0,10 b_{\text{исх}}^{0,68} \sigma_{\max}^{0,36} D^{0,32} s^{-0,16} v^{-0,02}$	
Электроме- ханическая : для предварительно обточенных поверхностей ($Ra_{\text{исх}} = 1,5 \div 6,2$ мкм)	$R_a = 0,006 Ra_{\text{исх}}^{1,03} I^{-0,03} \left(\frac{P}{10} \right)^{-0,4} v^{0,37} s^{0,35} p_p^{0,36} \times$ $\times (tg \varphi)^{1,03} ;$ $R_p = 0,026 Ra_{\text{исх}}^{0,98} I^{-0,04} \left(\frac{P}{10} \right)^{-0,34} v^{0,25} s^{0,41} p_p^{0,41} \times$ $\times (tg \varphi)^{0,88}$	<p>Обрабатываемый материал – сталь 45; $I = 1 \div 500$ А; $\varphi = 0,3 \div 0,7^\circ$; $P = 300 \div 800$ Н; радиус закругления ролика $p_p = 0,5 \div 1,5$ мм; $s = 0,07 \div 0,15$ мм/об</p>
для предварительно шлифованных по- верхностей ($Ra_{\text{исх}} = 0,35 \div 0,16$ мкм)	$R_a = 0,18 Ra_{\text{исх}}^{1,22} I^{-0,03} \left(\frac{P}{10} \right)^{-0,41} v^{0,36} s^{0,29} p_p^{0,2} \times$ $\times (tg \varphi)^{-0,28}$ $R_p = 0,21 Ra_{\text{исх}}^{0,96} I^{-0,03} \left(\frac{P}{10} \right)^{-0,37} v^{0,35} s^{0,3} p_p^{0,3} \times$ $\times (tg \varphi)^{-0,35}$	<p>То же</p>

Магнитно-абразивная	$Ra = 0,58 \frac{Ra_{исх}^{0,55} K^{0,15} \delta^{0,3}}{\tau^{0,52} B_1^{0,05} v^{0,08} v_0^{0,26}};$ $R_p = 1,08 \frac{Ra_{исх} K^{0,23} \delta^{0,05}}{\tau^{0,39} B_1^{0,05} v^{0,21} v_0^{0,13}}$	$\delta = 0,8 \div 2 \text{ мм};$ $B_1 = 0,3 \div 1,1 \text{ Тл};$ $v_0 = 3 \div 9 \text{ м/мин}$
Внутренние поверхности вращения		
Сверление	$Ra = 6,36 d^{0,25} v^{0,12} s^{0,41};$ $R_p = 52,4 \frac{d^{0,17} s^{0,52}}{v^{0,14}};$ $Rz = 48,7 \frac{d^{0,17} s^{0,46}}{v^{0,04}};$ $R_{max} = 61,3 d^{0,17} v^{0,02} s^{0,46};$ $Sm = 233,9 d^{0,23} v^{0,32} s^{0,62}$	Обрабатываемый материал – сталь 40X; d=12÷25 мм; v=12÷20 м/мин; s= 0,06÷0,14 мм/об
Зенкерование	$Ra = 5,6 \frac{v^{0,16} s^{0,76}}{d^{0,23}};$ $R_p = 254,8 \frac{s^{0,53}}{d^{0,52} v^{0,31}};$ $Rz = 458 \frac{s^{0,41}}{d^{0,64} v^{0,5}};$ $R_{max} = 98,4 \frac{s^{0,55}}{d^{0,47} v^{0,1}};$ $Sm = 1539 \frac{s^{0,85}}{d^{0,02} v^{0,22}}$	Обрабатываемый материал – сталь 40X; d=12÷25 мм; v=25÷40 м/мин; s= 0,3÷0,6 мм/об
Развертывание	$Ra = 0,1 \frac{d^{0,26} v^{0,89}}{s^{0,27}};$ $R_p = 0,85 \frac{d^{0,19} v^{0,36}}{s^{0,18}};$ $Rz = 1,82 \frac{d^{0,04} v^{0,4}}{s^{0,1}};$ $R_{max} = 2,5 \frac{d^{0,02} v^{0,35}}{s^{0,2}};$ $Sm = 403,5 \frac{v^{0,13}}{d^{0,02} s^{0,4}}$	Обрабатываемый материал – сталь 40X; d=12÷25 мм; v=5÷10 м/мин; s= 0,6÷1,6 мм/об
Растачивание получистовое и чистовое	$Ra = 76,2 \frac{s^{0,57} v^{0,03} j_{сч}^{0,04}}{10^{0,04} t^{0,08} p^{0,2} \alpha^{0,34} (50 + \gamma)^{0,35}};$ $R_p = 228,18 \frac{s^{0,65} j_{сч}^{0,05}}{10^{0,05} t^{0,02} p^{0,16} \alpha^{0,52} (50 + \gamma)^{0,23}};$ $Sm = 0,006 \frac{v^{0,03} s^{0,46} p^{0,12} (50 + \gamma)^{1,05}}{\alpha^{0,19}}$	Обрабатываемый материал – сталь 40X; t=0,15÷1мм; v=50÷150 м/мин; s= 0,05÷0,5 мм/об; p=0,5÷2 мм; γ=+4÷(–40°); α=3÷7°; j _{сч} =10000÷40000 Н/мм

Шлифование чистовое	$Ra = 92,5 \frac{s_{\text{пр}}^{0,39} s_{\text{ра.л}}^{0,05} i^{0,012} K^{0,06}}{v^{0,23} H^{0,04} i_{\text{ст}}^{0,98}};$ $R_p = 766 \frac{s_{\text{пр}}^{0,28} s_{\text{ра.л}}^{0,11}}{v^{0,16} i^{0,06} H^{0,53} K^{0,08} i_{\text{ст}}^{1,16}};$ $Sm = 0,002 \frac{v^{0,27} s_{\text{ра.л}}^{0,08} i^{0,29} H^{0,19} K^{0,62}}{s_{\text{пр}}^{0,02} j_{\text{ст}}^{0,33}}$	Обрабатываемый материал – сталь 40X; v= 20÷50 м/мин; s _{пр} = (0,5÷1) В; s _{ра.л} = 0,05÷0,1 мм/дв. ход; i=1÷5; H = СТ2-5, МЗ-3; K-16÷40; j _{ст} = 8000÷30000 Н/мм
Хонингование	$Ra = 0,028 \frac{\tau_1^{0,16} \rho_1^{0,03} p_2^{0,24} f^{0,4} A^{0,09}}{10^{1,35} v_1^{0,04} v_2^{0,33} \tau_2^{0,11}};$ $R_p = 0,024 \frac{\tau_1^{0,19} \tau_2^{0,04} p_1^{0,04} p_2^{0,34} f^{0,43} A^{0,08}}{10^{1,9} v_1^{0,05} v_2^{0,23}};$ $Sm = 0,017 \frac{\tau_1^{0,1} p_2^{0,16} f^{0,37} A^{0,3}}{v_2^{0,36} \tau_2^{0,17} 10^{0,8}}$	Обрабатываемый материал – сталь ШХ15; Ra _{исх} = 0,5 мкм. Обработка брусками из электрокорунда зернистостью 50/40 на керамической связке; СОТС – на основе керосина; v ₁ =26÷75 м/мин; v ₂ = 50÷150 м/мин; p ₁ =(5÷15)10 ⁵ Па; p ₂ = (3÷10)10 ⁵ Па; f=1300÷1900 мин ⁻¹ ; A=1÷2мм; τ = 5÷10 с.
Плоские поверхности		
Торцовое фрезерование чистовое	$Ra = 4,83 \frac{s_z^{1,69} t^{0,15}}{v^{1,23} \rho^{0,14} \gamma^{0,46}};$ $R_p = 87,3 \frac{s_z^{1,15}}{v^{1,27} \rho^{0,24} \gamma^{0,62}}$	Обрабатываемый материал - сталь ШХ15; Sz = 0,08÷0,5 мм/зуб; t= 0,3÷1,8 мм; v=18÷44 м/мин; p = 0,5÷2 мм; γ = 5÷20°
Строгание чистовое	$Ra = 37,3 \frac{s^{1,93} \gamma^{0,27}}{v^{0,11} t^{0,12} \rho^{0,8}};$ $R_p = 131,42 \frac{s^2 \gamma^{0,15}}{v^{0,13} t^{0,29} \rho^{0,8}}$	Обрабатываемый материал – сталь ШХ15; s = 0,25÷0,5 мм/дв. ход; v = 5,6÷22 м/мин; остальные параметры (t, p, γ) — как и при фрезеровании
Торцовое точение	$Ra = 10,88 \frac{s^{1,69} \gamma^{0,59}}{\rho^{0,3}};$ $R_p = 58,8 \frac{s^{1,49} \gamma^{0,36}}{\rho^{0,35}}$	Обрабатываемый материал – сталь ШХ15; s=0,1÷0,5 мм/об; γ и p— как и при фрезеровании
Шлифование чистовое	$Ra = 0,27 \frac{K^{0,48} v^{0,27} s^{0,8} t^{0,13}}{i^{0,11}};$ $R_p = 2,28 \frac{K^{0,29} v^{0,2} s^{0,32} t^{0,12}}{i^{0,13}}$	Обрабатываемый материал – сталь 12ХН3А; v = 0,21÷0,37 м/с; s _{поп} =3 ÷ 6 мм/ход; t= 0,01÷0,04 мм; i=1÷5; K 46-100

Шлифование отделочное	$y_i = Ra(R_p, Sm) = H^c k_0 K k_1 v^{k_2} s^{k_3} t^{k_4}$	Обрабатываемый материал и значения коэффициентов c, k_0-k_4 для алмазных и абразивных кругов приведены в табл. 13 [24]. Для связки С2 $H=2$; для СМ2 $H=1$
Накатывание шариковыми головками	$Ra = k_0 \frac{Ra_{исх}^{k_1} s_{пр}^{k_2} 10^{K_2}}{p^{k_3} i^{k_4} v^{k_5}},$ $R_p = k_0 \frac{R_{p\text{исх}}^{k_1} s_{пр}^{k_2} 10^{K_2}}{p^{k_3} i^{k_4} v^{k_5}}$	$s_{пр} = 13 \div 42$ мм в 1 мин. На один деформирующий элемент; $p=200\div600$ МПа; $i=1\div3$; при $D = 90$ мм $v = 14 \div 70$ м/мин. Значения k_0-k_5 приведены в табл. 14 [24]
Вибронакатывание	$Ra = k_0 \frac{Ra_{исх}^{k_1} s_{пр}^{k_2}}{p^{k_3} i^{k_4}};$ $R_p = k_0 \frac{R_{p\text{исх}}^{k_1} s_{пр}^{k_2}}{p^{k_3} i^{k_4}}$	Значения коэффициентов $k_0 - k_4$ при обработке различных материалов приведены в табл. 15 [24].
Обозначения: s – подача; v – скорость резания; p – радиус при вершине резца; γ – передний угол; B – ширина круга; $s_{рад}$ – радиальная подача; i – число выхаживаний; K – зернистость круга; H – твердость круга; $j_{ст}$ – жесткость станка; $s_{пр}$ – продольная подача; P – сила прижима; p – давление бруска; v_d – скорость вращения детали; τ – время обработки; $Ra_{исх}$ – исходная шероховатость; α_1 – угол атаки; D – диаметр шарика; σ – давление в контакте; I – сила тока; δ – зазор между полюсниками и деталью; B_1 – магнитная индукция; r_p – радиус закругления ролика; t – глубина резания; α – задний угол; v_1 и v_2 – скорости вращательного движения при черновом и чистовом хонинговании соответственно; p_1 и p_2 – давление брусков при черновом и чистовом хонинговании соответственно; f – частота колебаний инструмента; A – амплитуда колебаний; φ – задний угол вдавливания.		

Опорная площадь может оказаться одинаковой для нескольких поверхностей, обработанных различными методами. Отличие таких поверхностей устанавливают по геометрическим характеристикам отдельных микронеровностей: каждому методу обработки соответствует определенный диапазон изменения углов профиля и радиусов закругления выступов в зависимости от высоты шероховатости поверхностей. В преобладающем большинстве случаев радиус $r_{пр}$, закругления вершин микронеровностей в продольном направлении превышает радиус r_n закругления в поперечном направлении. Угол β_n профиля микронеровности для поперечного направления больше чем угол $\beta_{пр}$ для продольного. С уменьшением высоты неровностей наблюдается общая тенденция к уменьшению углов профиля и соответствующему увеличению радиусов закругления выступов.

Геометрические характеристики микронеровностей, высота неровностей, их шаги связаны между собой. С уменьшением высоты неровностей при каждом методе обработки возрастает соотношение между шагом неровностей профиля S и высотой R_{max} . Для

большинства методов механической обработки при средней высоте неровностей поверхностей шаг S_n поперечной шероховатости не превышает $40R_{max}$ (шлифование, точение, строгание, фрезерование, растачивание стальных и чугунных деталей). Для неровностей меньшей высоты их шаги могут достигать почти $300R_{max}$. Шаг $S_{пр}$ продольной шероховатости обычно превышает шаг поперечной шероховатости. Отношение этих величин в большинстве случаев не превышает 15, хотя в отдельных случаях достигает 40. Абсолютные значения шага продольных неровностей достигают $800R_{max}$. Следовательно, чем больше радиусы закругления выступов, тем меньше углы профиля и больше размеры оснований отдельных неровностей и их шаг (при определенной высоте шероховатостей). Значения приведенного радиуса закругления выступов и отношения r/R_{max} для различных методов обработки резанием даны в приложении В.

При необходимости получения более точных значений, характеризующих опорную площадь и другие геометрические параметры качества поверхности деталей, учитывают конкретные условия выполнения для технологической операции (материал обрабатываемой детали, получаемую шероховатость при определенных режимах обработки, материал инструмента и т. д.). При этом во многих случаях целесообразно также учитывать технологическую наследственность.

Применение СОТС способствует улучшению процесса стружкообразования, что приводит к уменьшению износа, а следовательно, повышению стойкости инструмента, и к уменьшению силы резания. В результате уменьшается величина упругих отжатий элементов технологической системы, а следовательно, улучшается шероховатость, снижается волнистость, увеличивается точность обрабатываемых поверхностей деталей машин.

В качестве СОТС используют растительные и осерненные минеральные масла - сульфифрезолы, эмульсии, которые снижают шероховатость обрабатываемых поверхностей на 25...40 %, по сравнению с обработкой без охлаждения.

Тщательная очистка и фильтрация СОТС, с целью удаления абразива и стружки, также способствуют улучшению шероховатости при шлифовании и других способах абразивной отделочной обработки - суперфинише, хонинговании.

Волнистость в процессе механической обработки поверхности образуется главным образом в связи с вибрацией из-за недостаточной жесткости технологической системы. Вообще говоря, волнистость может образовываться на детали в двух взаимно перпендикулярных направлениях: продольная и поперечная волнистость. Если первая обычно возникает в результате вибрации технологической системы, то вторая вызывается неравномерностью подачи, неправильной правкой шлифовального круга, неравномерностью его износа и т. д. В любом случае волнистость определяется условиями выполнения технологического процесса и метода обработки. Наличие волн на поверхности приводит к уменьшению опорной площади в 5—10 раз по сравнению с ровной шероховатой поверхностью.

3.3 Технологическое обеспечение геометрических показателей качества поверхностного слоя деталей машин при обработке поверхностным пластическим деформированием обработки

Сущность ППД заключается в том, что требуемые размеры и качество поверхностей деталей достигается не срезанием материала, а его пластическим

формоизменением. В процессе ППД одновременно с изменением шероховатости поверхности детали производится её упрочнение, и как следствие значительно улучшаются эксплуатационные свойства детали, повышается их надежность. ППД позволяет эффективно влиять на повышение долговечности деталей, работающих в условиях знакопеременных нагрузок, трения и воздействия коррозионных сред. Во многих случаях применением ППД удаётся повысить запасы прочности деталей, работающих при переменных нагрузках в 1,5-3 раза, увеличить срок службы в десятки раз.

Все многообразие методов обработки пластическим деформированием можно классифицировать по ряду существенных признаков (рис. 4.15). По виду затрачиваемой энергии они относятся к методам механической обработки. По распространению очага пластической деформации различают процессы пластической деформации объемные и поверхностные. Процесс пластической деформации называется объемным, если пластическая деформация распространяется по всему объему заготовки. Если пластическая деформация локализуется и не распространяется по всему объему заготовки, то такие процессы называют процессами поверхностного пластического деформирования (ППД). В соответствии с ГОСТ 18296-72 под ППД следует понимать обработку давлением, при которой деформируется только поверхностный слой металла. Исходя из условий работы инструмента, методы обработки ППД могут быть разделены на четыре вида: статическое ППД, ППД в условиях трения скольжения, ППД в условиях трения качения, ударное ППД.

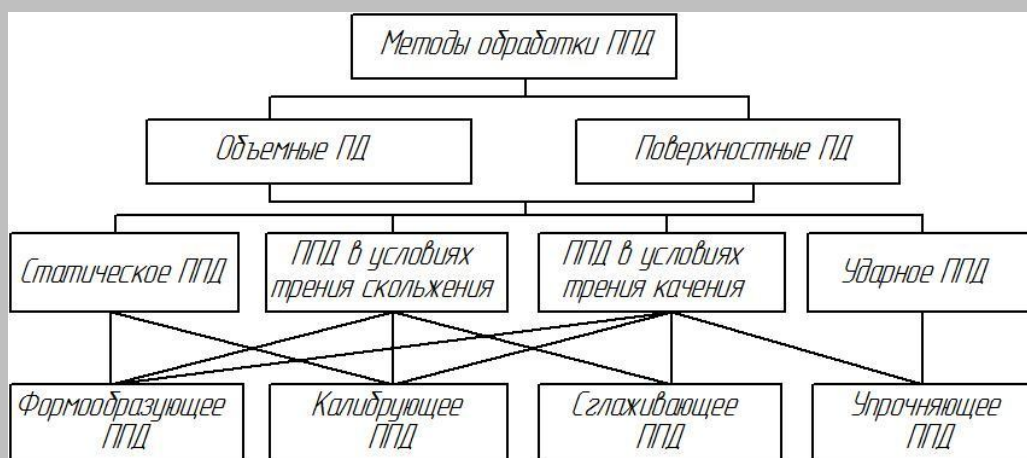


Рис. 4.15. Классификация методов пластического деформирования

Рассмотрим подробнее эти виды.

1. Статическое ППД – поверхностно пластическое деформирование при статическом взаимодействии деформируемого материала с инструментом, рабочими телами или средой. Деформирование поверхности заготовки в этом случае в основном осуществляется вследствие действия нормальных к поверхности сил (статическое деформирование поверхности торцом гладкого или фигурного пуансона).

2. ППД в условиях трения скольжения – поверхностное пластическое деформирование при скольжении инструмента по локально контактирующей с ним поверхности обрабатываемого материала. Для этого вида характерно наличие в зоне контакта инструмента и детали не только нормальных сил, но и сил трения,

появляющихся вследствие перемещения инструмента по образующей обрабатываемой поверхности. Силы трения значительно изменяют схему напряженного состояния металла в зоне его контакта с инструментом и оказывают существенное влияние на процесс деформирования поверхностного слоя. На использовании трения скольжения основаны процессы выплаживания поверхностей, поверхностное дорнование и поверхностное редуцирование.

3. ППД в условиях трения качения – поверхностно пластическое деформирование при качении инструмента по поверхности деформируемого материала. К этому виду ППД относятся многочисленные методы обработки деталей роликовыми и шариковыми инструментами. К этой же группе можно отнести процессы накатывания различных профилей, резьб, зубчатых колес, так как они осуществляются по кинематике качения.

4. Ударное ППД – поверхностно пластическое деформирование при ударном воздействии деформируемого материала с инструментом, рабочими телами или средой. Деформирование при больших скоростях относительного соударения и перемещение и детали приводит к значительному поверхностному наклепу – изменению структуры металла без его полной рекристаллизации. Величина и степень наклепа зависят от массы соударяющихся тел, скорости их относительного движения и других факторов, определяющих энергию удара инструмента об обрабатываемую поверхность. К этой же группе можно отнести дробеструйную, дробеметную обработку, ударно-импульсную обработку и др.

К способам обработки ППД с ударным воздействием рабочих тел относятся: обработка дробью, центробежная обработка, галтовка, обработка металлическими щетками, упрочняющая чеканка и др. В зависимости от технологического назначения процессы ППД делят также на формообразующие, калибрующие и упрочняющие.

Формообразующие ППД – это поверхностное пластическое деформирование, образующее определенную макро- и (или) микрогеометрическую форму поверхности деформируемого материала. В отличие от формообразования при объемном пластическом деформировании поверхностное пластическое деформирование осуществляется за счет пластического течения поверхностных слоев материала заготовки. При формообразовании ППД, как правило, простая поверхность преобразуется в более сложную, причем образование необходимой формы при этом совмещается с отделкой поверхности и упрочнением поверхностного слоя материала (например, накатывание). С помощью процессов поверхностного пластического формообразования в настоящее время можно получать мелко модульные зубчатые колеса, наружные и внутренние шлицы, резьбы, конусные детали типа штифтов, ступенчатые и гладкие валы, сферические и другие детали.

Калибрующие методы ППД - это поверхностное пластическое деформирование, изменяющее размеры заготовки до допускаемых размеров. При калибрующем ППД наряду с повышением точности размеров и формы обеспечивается значительное снижение шероховатости и упрочнение поверхности детали.

Сглаживающее ППД – это поверхностное пластическое деформирование, уменьшающее шероховатость поверхности деформируемого материала.

Упрочняющее ППД – это повышение сопротивляемости материала или заготовки разрушению или остаточной деформации поверхностным наклепом. Поверхностный наклеп приводит к изменению структуры материала без его его полной рекристаллизации,

причем материал находится в статически напряженном состоянии. Упрочнение наклепом приводит к повышению поверхностной твердости и микротвердости. В поверхностном наклепанном слое создаются сжимающие напряжения. Сжимающие остаточные напряжения уменьшаются по мере удаления от поверхности, переходя на некоторой глубине в уравнивающие их растягивающие напряжения.

Однако, зачастую один и тот же способ ППД может реализовать различные технологические задачи в зависимости от применяемых режимов обработки.

Основными технологическими факторами, определяющими шероховатость поверхности при ППД являются подача, скорость вращения детали, глубина натяга, радиус индентора при обработке деформирующим инструментом.

При ППД формирование микрорельефа поверхности быть осуществлено двумя способами воздействия на поверхность детали: либо твердыми телами, либо концентрированными потоками (полями) энергии.

ППД твердыми телами является наиболее распространенным способом обработки. Его осуществляют путем воздействия на обрабатываемую поверхность одного или нескольких обрабатывающих тел. Этот способ ППД лежит в основе целой гаммы методов, которые по характеру силового взаимодействия обрабатывающего тела с обрабатываемой поверхностью можно разделить на две большие группы: квазистатические и динамические (ударные). Квазистатические предполагают создание деформационного усилия от обрабатывающего тела при его непрерывном контакте с деталью. Условно они отличаются от ударных методов отсутствием инерционных сил при взаимодействии обрабатывающего тела с деталью. При использовании в технологических целях физико-химических явлений, поверхностная пластическая деформация осуществляется "бесконтактным способом" – путем воздействия на поверхность энергонесущей среды в виде концентрированного потока энергии. К числу таких методов ППД относятся: обработка в магнитном поле, взрывной волной, электронно-ионной и квантовой технологией, импульсными воздушными струями, барофрагментация.

Применяемые в практике процессы ППД характеризуются наличием непрерывного или дискретного контакта. Последние, представляющие в основном группу динамических методов обработки твердыми телами, могут быть разделены на процессы с регулярным и со стохастическим формированием локальных очагов деформации (отпечатков) - соответственно формируется регулярный, частично-регулярный ли стохастический микрорельеф.

К числу динамических методов ППД, при обработке которыми формирование локальных очагов деформации носит регулярный характер, относятся методы обработки единичным индентором или набором инденторов. Основную группу ударных методов ППД составляют методы обработки свободно движущимися телами. Стохастический характер формирования лежит в основе динамических методов обработки направленным потоком, порционными массами и с соударением частиц энергонесущей среды. Соответственно формируется стохастический микрорельеф (шероховатость) поверхности.

При обработке деталей свободно движущимися телами, поверхностное пластическое деформирование осуществляется в результате ударно-импульсного воздействия на обрабатываемую поверхность отдельных обрабатывающих тел, в качестве которых может быть использована стальная, чугунная, стеклянная или изготовленная из материала детали дробь различной формы, типа и размера.

Как при квазистатическом, так и при ударном воздействии обрабатывающих тел энергонесущей среды на обрабатываемой поверхности формируется совокупность пластических отпечатков образующих на поверхности характерный для обработки методами ППД микрорельеф. Глубина пластически деформированного поверхностного слоя h пропорциональна диаметру пластического отпечатка d . Для различных условий обработки $h=1 \dots 2d$. Зависимость между диаметром пластического отпечатка d , формируемого на поверхности, и силовым воздействием обрабатывающего тела (например сферического индентора) P при его внедрении в упругой и пластической областях описывается уравнениями Герца и Мейера:

$$P = \frac{1}{3D \left(\frac{1-\mu^2}{E} + \frac{1-\mu_1^2}{E_1} \right)} d^3;$$

$$P = ad^n, \quad (4.2)$$

где D - диаметр сферического индентора; E, E_1 - модули упругости материала сферического индентора и обрабатываемого материала; μ, μ_1 - коэффициенты Пуассона материала сферического индентора и обрабатываемого материала; a, n - константы пластичности.

Микрорельеф, который формируется на поверхности детали методами ППД, позволяет обеспечить улучшение ряда эксплуатационных характеристик поверхностного слоя детали.

Форма неровностей, формируемая на поверхности детали, повторяет форму рабочей поверхности деформирующих тел. Наиболее часто в качестве формы деформирующих тел (или их рабочей поверхности) используется сфера. В результате на поверхности детали образуется микрорельеф из пересекающихся сферических лунок или канавок (вогнутый), что приводит к отсутствию микроконцентраторов напряжений, следствием чего является увеличение усталостной прочности детали, коррозионной стойкости поверхности, повышением смазкоудерживающей способности, при этом может несколько снижаться износостойкость поверхности.



Рис. Вогнутый микрорельеф

Стохастический вогнутый микрорельеф может быть получен виброударной обработкой (ВиУО), вибрационной ударно-импульсной обработкой (ВиУИО), дробеструйной и дробеметной обработкой, галтовкой в стальных шарах и др.

3.4 Технологическое обеспечение геометрических показателей качества поверхностного слоя деталей машин при физико-химических методах обработки

Разрушение поверхностных слоев материала под влиянием внешнего воздействия электрических разрядов называется электрической эрозией. Электроэрозионная обработка

заключается в изменении формы, размеров, шероховатости и свойств поверхности заготовки под воздействием электрических разрядов в результате электрической эрозии.

На явлении эрозии основан принцип электроэрозионной обработки (ЭЭО). При электроэрозионной обработке используют явление эрозии (разрушения) электродов из токопроводящих материалов при пропускании между ними импульсов электрического тока. Обработанная поверхность представляет собой совокупность лунок, глубина которых определяет шероховатость поверхности.

Электроискровая обработка основана на использовании искрового разряда. При этом в канале разряда температура достигает 10000°C , развиваются значительные гидродинамические силы, но сами импульсы относительно короткие и, следовательно, содержат мало энергии, поэтому воздействие каждого импульса на поверхность материала невелико. Метод позволяет получить хорошую поверхность, но не обладает достаточной производительностью. Кроме того, при этом методе износ инструмента относительно велик (достигает 100 % от объёма снятого материала). Метод используется в основном при прецизионной обработке небольших деталей, мелких отверстий, вырезке контуров. Твердосплавных штампов проволочным электродом. Мягкий режим обработки позволяет получать размеры с точностью до $0,002\text{ мм}$ при шероховатости поверхности $Ra\ 0,63\dots 0,16\text{ мкм}$.

Электроимпульсная обработка основана на использовании импульсов дугового разряда. Дуговой разряд имеет температуру плазмы $4000\text{--}5000^{\circ}\text{C}$. Характерное для дугового разряда преимущественно разрушение катода приводит к тому, что износ инструмента (в этом случае он подключается к аноду) ниже, чем при электроискровой обработке, составляя $0,05\text{--}0,3\%$ от объёма снятого материала (иногда инструмент вообще не изнашивается). Электроимпульсный метод используется в основном для черновой обработки и для трёхкоординатной обработки фасонных поверхностей. Качество поверхности зависит от режимов обработки. Грубый режим приводит к получению высоты неровностей $Ra=50\dots 6,3\text{ мкм}$ и изменению поверхностного слоя глубиной $0,2\dots 0,4\text{ мм}$. При чистовом режиме достигается шероховатость поверхности $Ra\ 6,3\dots 1,25\text{ мкм}$. Обработка ведется в жидком диэлектрике, инструмент автоматически подается в направлении обработки, что обеспечивает постоянство зазора. Для обработки используются специальные станки разных моделей с машинными генераторами, высокочастотными установками, электронными генераторами и т. д. Высокоточные станки с различными системами программного управления позволяют изготавливать детали со сложными формами.

Электроискровую обработку применяют для повышения точности и уменьшения шероховатости поверхностей, обработанных электроэрозионным методом. Метод основан на использовании электрических импульсов малой мощности при частоте $100\dots 150\text{ кГц}$. Производительность метода в $30\dots 50$ раз выше, чем при электроискровом методе, при значительном увеличении точности и уменьшении шероховатости поверхности. Высокочастотный электроискровой метод применяют при обработке заготовок из твердых сплавов, так как он исключает структурные изменения и образование микротрещин в поверхностном слое материала обрабатываемой заготовки.

Электроконтактная обработка основана на локальном нагреве заготовки в месте контакта с электродом-инструментом и удалении размягченного или даже расплавленного металла из зоны обработки механическим способом: относительным движением заготовки и инструмента. Источником теплоты в зоне обработки служат импульсные дуговые

разряды. Электроконтактную обработку оплавлением рекомендуют для обработки крупных деталей из углеродистых и легированных сталей, чугуна, цветных сплавов, тугоплавких и специальных сплавов, применяют при зачистке отливок от заливов, от резке литниковых систем и прибылей, зачистке проката из спецсплавов, черновом круглом наружном, внутреннем и плоском шлифовании корпусных деталей машин из труднообрабатываемых сплавов, шлифовании с одновременной поверхностной закалкой деталей из углеродистых сталей. Метод обработки не обеспечивает высокой точности и качества поверхности (шероховатость поверхности около 50 мкм), но дает высокую производительность съема металла вследствие использования больших электрических мощностей. Преимущества метода – высокая производительность (до $10^6 \text{ мм}^3/\text{мин}$) на грубых режимах, простота инструмента, работа при относительно небольших напряжениях, низкие удельные давления инструмента – $30\text{--}50 \text{ кН/м}^2$ ($0,3\text{--}0,5 \text{ кгс/см}^2$) и, как следствие, возможность использования для обработки твёрдых материалов инструмента, изготовленного из относительно мягких материалов. К недостаткам относят: большую шероховатость обработанной поверхности, тепловые воздействия на металл при жёстких режимах. Разновидностью электроконтактной обработки является электроабразивная обработка – обработка абразивным инструментом (в т. ч. алмазно-абразивным), изготовленным на основе проводящих материалов.

Электрохимическая обработка. К электрохимической обработке относится группа методов, основанных на явлении анодного растворения. При пропускании тока между электродами происходит растворение металла анода. Образующийся продукт растворения в виде солей или гидроокисей металлов удаляется с поверхности либо гидравлическим потоком электролита, либо механическим путем. При прошивке отверстий электролит подают во внутреннюю полость электрода под давлением. Участки поверхности, не подвергаемые обработке, и нерабочие поверхности инструмента изолируют токонепроводящими материалами. Электрохимическую разрезку заготовок и вырезку деталей по сложному контуру выполняют дисковыми проволочными электродами в проточном электролите. Вырезка производится с точностью $0,08\text{--}0,5 \text{ мм}$ и чистотой поверхности $Ra\ 1,25\text{--}2 \text{ мкм}$.

Основным преимуществом электрохимической размерной обработки является высокая производительность (например, скорость прошивки малых отверстий диаметром до $1,5 \text{ мм}$ составляет 2 мм/мин , для больших отверстий до 8 мм – $10\text{--}19 \text{ мм/мин}$), точность размеров (до) и высокая чистота поверхности $Ra\ 0,16\text{--}0,32 \text{ мкм}$. Шероховатость зависит от температуры электролита и плотности тока – при более низких температурах чистота поверхности повышается; снижение плотности тока улучшает шероховатость, но при этом производительность уменьшается.

Современные станки для электрохимической обработки управляются системами ЧПУ. В процессе обработки система ЧПУ задает и контролирует величины напряжения и тока, постоянство рабочего зазора, скорость потока и концентрацию электролита.

Электрохимическое полирование основано на том, что на микровыступах полируемой поверхности анода-детали плотность тока выше, чем на впадинах, и поэтому анодное растворение происходит избирательно, на выступах микронеровностей, а микровпадины заполняются непроводящими продуктами растворения. В результате происходит сглаживание поверхности, и шероховатость снижается, по сравнению с исходной. Одновременно устраняются микротрещины, наклеп и другие поверхностные дефекты, возникающие при предшествующей обработке. Этим методом производят

снятие заусенцев после механической обработки или штамповки, наружное и внутреннее полирование тонкостенных труб, полирование тонких лент фольги.

Ультразвуковая обработка материалов – разновидность механической обработки, основанная на разрушении обрабатываемого материала абразивными зернами под ударами инструмента, колеблющегося с ультразвуковой частотой. Источником энергии служат ультразвуковые генераторы тока с частотой 16 – 30 кГц. Инструмент получает колебания от ультразвукового преобразователя с сердечником из магнитострикционного материала (пермендюр, никель, альфер, феррит). При совпадении частоты колебаний тока от генератора с собственной частотой колебаний магнитострикционного сердечника наступает резонанс, и амплитуда колебаний торца сердечника достигает 2 – 10 мкм.

Формы и размеры инструмента определяются формами и размерами получаемых отверстий. В качестве материала инструмента применяют: твердые сплавы, закаленную инструментальную сталь (У9), нержавеющую сталь, латунь. Для обработки деталей из твердых и хрупких материалов применяют инструменты из вязких материалов, а для обработки деталей из мягких и вязких материалов – инструменты из твердых и износостойких материалов. Из абразивных материалов используют карбид бора, карбид кремния и электрокорунд. Зернистость выбирают в зависимости от свойств обрабатываемого материала, требуемой точности и шероховатости обрабатываемой поверхности. Процесс обработки заключается в том, что торец инструмента, колеблющийся с ультразвуковой частотой, ударяет по зернам абразива, лежащим на необрабатываемой поверхности, которые скалывают частицы материала заготовки. Для нормальной работы зазор между торцом инструмента и обрабатываемой поверхностью должен быть постоянным, что обеспечивается автоматической регулировкой подачи инструмента. Абразивную суспензию в зону обработки подают под давлением по патрубку насосом.

Ультразвуковым методом обрабатывают хрупкие твердые материалы: стекло, керамику, ферриты, ситаллы, кремний, кварц, драгоценные материалы, в том числе, алмазы, твердые сплавы, титановые сплавы, вольфрам. Этим методом получают глухие и сквозные отверстия любой формы, в поперечном сечении, канавки, пазы. Ультразвуковые методы используются в технологических целях для очистки поверхностей деталей от загрязнений, пайки алюминиевых проводов, сварки тонких проводов с проводящими пленками микросхем.

Электронно-лучевая обработка основана на превращении кинетической энергии направленного пучка электронов в тепловую. Высокая плотность энергии сфокусированного луча позволяет обрабатывать заготовки за счет нагрева, расплавления и испарения материала с узлокального участка. Электронно-лучевой метод применяют для обработки тугоплавких и легко окисляемых на воздухе металлов и сплавов: вольфрама, молибдена, титана, меди, а также неметаллических материалов: рубина, керамики, кварца, ферритов, полупроводниковых материалов. Размерную обработку используют для прошивки отверстий диаметром 0,01 – 1 мм, прорезания пазов, вырезания деталей из тонколистовых заготовок по контуру, получения сеток из фольги и др. Кроме того, электронный луч широко применяют для сварки деталей из тугоплавких химически активных металлов и их сплавов (вольфрамовых, танталовых, молибденовых, ниобиевых, циркониевых и т.п.

Светолучевая (лазерная) обработка основана на тепловом воздействии светового луча высокой энергии на поверхность обрабатываемой заготовки. Источником светового

излучения служит лазер – оптический квантовый генератор (ОКГ). Созданы конструкции твердотельных, газовых и полупроводниковых ОКГ. Их работа основана на принципе стимулированного генерирования светового излучения. Для механической обработки используют твердотельные ОКГ, рабочим элементом которых является рубиновый монокристаллический стержень, состоящий из оксидов алюминия, активированных 0,05% хрома. Рубиновый ОКГ работает в импульсном режиме, генерируя импульсы когерентного монохроматического красного цвета, длиной волны 0,69 мкм. Лазерную обработку применяют для прошивания сквозных и глухих отверстий, резки заготовок на части, вырезания заготовок из листовых материалов по сплошному контуру, прорезания пазов. Этим методом можно обрабатывать заготовки из любых материалов, включая самые твердые и прочные. Широко используются ОКГ для сварки различных металлов.

4.1, 4.2 Технологическое обеспечение структурозависимых показателей качества поверхностного слоя деталей машин при лезвийной и абразивной обработке

Физико-механические свойства. Поверхностный слой детали после механической обработки пластически деформирован. Поэтому физическое состояние поверхностного слоя после механической обработки в основном характеризуется деформационными изменениями в нем, следствием которых и является его деформационное упрочнение (наклеп) или разупрочнение (отдых, возврат). При упрочнении повышаются предел прочности, твердость, снижается пластичность, изменяются другие физические свойства металла. Наклеп способствует повышению износостойкости, усталостной прочности, контактной усталости. Существует оптимальное значение микротвердости для конкретных условий.

У стальных деталей в образующемся в результате лезвийной обработки поверхностном пластически деформированном слое могут различаться три зоны (рис. 4.3):

1. Зона резко выраженной деформации - дефектный слой с измельченным зерном, значительными искажениями кристаллической решетки, деформированной структурой, наличием механических повреждений с резким повышением твердости материала.
2. Зона деформации с характерной текстурой: вытянутыми в направлении рабочего движения инструмента зернами; наволакиванием одних зерен на другие. Твердость материала в этой зоне заметно снижается по сравнению с прилегающей к поверхности.
3. Зона перехода от наклепа к исходному материалу.

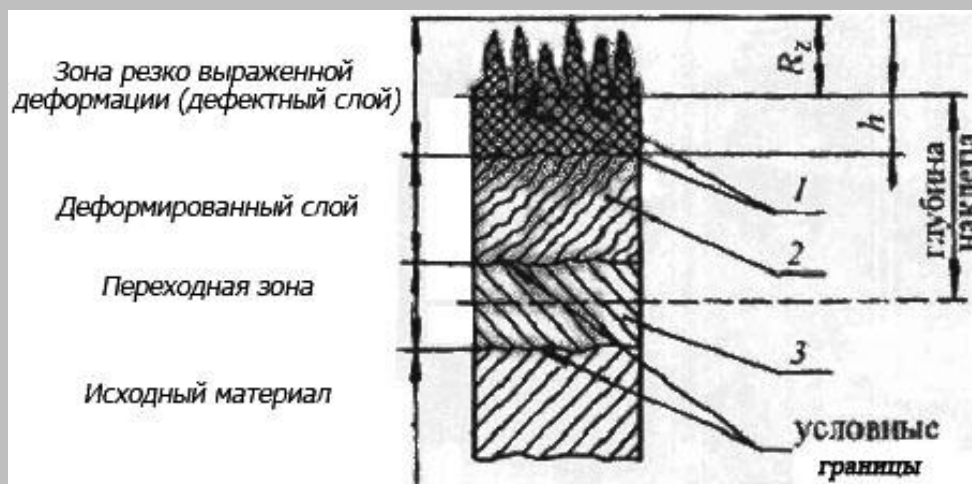


Рис. 3.3. Структура поверхностного слоя обработанной поверхности: 1 - зона резко выраженной деформации, (дефектный слой); 2 - деформированный слой (собственно наклеп); 3 - переходной слой; h - глубина дефектного слоя .

Деформационное упрочнение (разупрочнение) поверхностного слоя зависит от режимов резания, геометрии режущего инструмента, его износа и других условий обработки. Глубина залегания упрочненного слоя и степень наклепа тем выше, чем больше величина сил, продолжительность их воздействия и интенсивность пластической деформации металла. Одновременно с процессом упрочнения протекает противоположный ему процесс разупрочнения, который стремится вернуть металл поверхностного слоя в исходное, ненаклепанное состояние. Интенсивность процесса разупрочнения полностью определяется значением температуры и временем ее воздействия на металл поверхностного слоя. Если режим резания или другие условия обработки изменяются таким образом, что количество теплоты, генерируемой в зоне резания, возрастает, то следует ожидать уменьшения степени и глубины наклепанного слоя. При высокой температуре в зоне резания и достаточно продолжительном ее воздействии процесс разупрочнения может быть настолько интенсивным, что наклеп в поверхностном слое полностью снимается.

Степень и глубина упрочнения зависят от целого ряда параметров обработки, в том числе от скорости резания, подачи, геометрии инструмента, величины его износа. По мере увеличения (до определенных пределов) скорости резания глубина наклепа возрастает. При высоких скоростях (200 — 600 м/мин) возникает явление разупрочнения, которое уменьшает глубину наклепа. При обработке деталей из легированных и высокопрочных сталей, имеющих низкие пластические свойства, остаточные напряжения сжатия образуются при скоростях резания 400— 600 м/мин. При обработке деталей из конструкционных сталей 20 и 45 остаточные напряжения сжатия возникают при скоростях резания 500—800 м/мин и отрицательных передних углах. При точении сплава ЭИ437А с увеличением скорости резания от 2 до 5 м/мин глубина наклепанного слоя уменьшается от 141 до 97 мкм, а степень наклепа от 50 до 35%. Это связано с тем, что с увеличением скорости резания повышаются температура на поверхности детали и скорость деформирования. В то же время если материал не склонен к наростообразованию, то при этом непрерывно снижаются усилия резания и степень деформирования срезаемого слоя. Эти факторы способствуют уже снижению как глубины, так и степени наклепа.

Таблица 3.6. Влияние видов обработки на физические свойства поверхности слоев

Вид обработки	Степень наклепа = ($H_{\text{поверхности}}/H_{\text{середины}}$)·100%	Глубина наклепа, мкм
Точение:		
обычное и скоростное	120—150	30-50
тонкое	140-180	20-60
Фрезерование:		
торцовое	140-160	40-100

цилиндрическое	120-140	40-80
Сверление и зенкерование	160-170	180-200
Развертывание	—	150-200
Протягивание	150-200	20-75
Зубофрезерование и зубодолбление	160-200	120-150
Шевингование зубьев	—	До 100
Шлифование:		
круглое деталей из сталей:		
незакаленной углеродистой	140-160	30-60
низкоуглеродистой	160-200	30-60
закаленной	125-130	20-40
плоское	150	16-35

При увеличении подачи возрастают глубина наклепа и остаточные напряжения. Глубина резания не оказывает существенного влияния на глубину наклепа.

С повышением твердости обрабатываемого материала уменьшается объем, подвергаемый пластической деформации. Чем мягче сталь, тем глубже распространяется пластическая деформация.

Поверхностный слой детали после механической обработки находится в напряженном состоянии. В нем возникают остаточные растягивающие или сжимающие напряжения. Величина, знак и закономерность распределения напряжений зависят от свойств обрабатываемого материала, методов и режимов обработки. Величина и знак остаточных напряжений оказывают влияние на усталостную прочность, предел выносливости. В большинстве случаев благоприятными являются сжимающие остаточные напряжения.

Применение инструментов с отрицательными передними углами от 15^0 до 45^0 способствует образованию в поверхностном слое остаточных напряжений сжатия. При увеличении заднего угла в пределах $3—15^0$ глубина наклепа уменьшается. При уменьшении главного угла в плане от 90 до 45^0 глубина наклепа снижается. Применение тщательно доведенного инструмента способствует уменьшению глубины наклепа. Увеличение радиуса скругления режущей кромки способствует возрастанию глубины наклепа и остаточных напряжений.

Остаточные напряжения. После механической обработки (точения, фрезерования, шлифования и др.) могут возникать значительные остаточные напряжения. Особенность этих остаточных напряжений состоит в том, что они действуют практически только в поверхностных слоях глубиной в несколько десятых долей миллиметра. Возникновение остаточных напряжений связано с пластической деформацией при воздействии режущего инструмента и с нагреванием поверхностных слоев выделяющейся теплотой резания. При силовом воздействии инструмента возникает пластическая деформация растяжения, и после снятия этого воздействия в поверхностном слое образуются остаточные напряжения сжатия.

Пластическая деформация металла вызывает уменьшение его плотности, а следовательно, обуславливает рост удельного объема, достигающего $0,3-0,8\%$ удельного объема до пластической деформации. Это увеличение объема распространяется на

глубину проникновения пластической деформации. Увеличению объема пластически деформированного металла препятствуют нижележащие слои. В результате этого в наружном слое возникают сжимающие, а в нижележащих слоях - растягивающие остаточные напряжения (рис. 3.4).

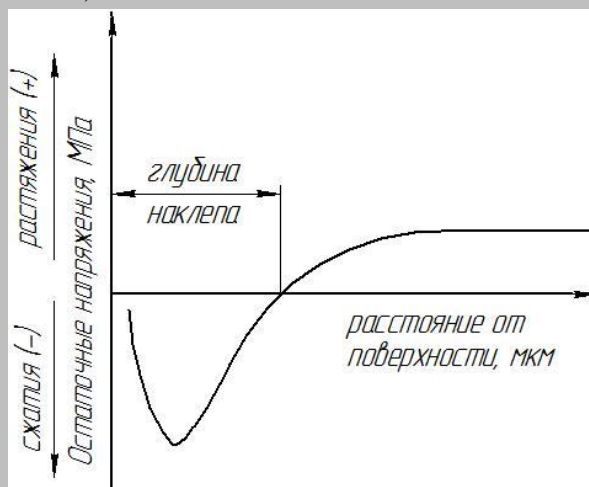


Рис. 3.4 Характерная эпюра остаточных напряжений в поверхностном слое.

Кроме того, режущий инструмент вытягивает кристаллические зерна слоя металла под режущим клином в направлении резания. После прекращения резания и удаления режущего инструмента пластически растянутые верхние слои, связанные как единое целое с нижележащими слоями, приобретают остаточные напряжения сжатия, ориентированные по направлению резания. Соответственно этому в нижележащих слоях развиваются уравнивающие их остаточные напряжения растяжения. В направлении подачи протекают аналогичные процессы, вызывающие возникновение осевых остаточных напряжений.

Выделение тепла в процессе резания (вследствие, работы деформации и трения) приводит к большим температурным градиентам и температурным напряжениям, которые могут превосходить предел текучести материала. После установления нормальной температуры в поверхностных слоях детали происходит деформация сжатия. Этому препятствуют нижележащие слои. В результате в поверхностных слоях появляются растягивающие остаточные напряжения, а в нижележащих - напряжения сжатия, уравнивающие растягивающие напряжения.

Таким образом, сочетание двух основных факторов при резании - силового и температурного - действуют в противоположные стороны, что и объясняет существенную зависимость величины и знака остаточных напряжений от технологического режима обработки. Например, остаточные напряжения при точении зависят от скорости резания и подачи, величины переднего угла резца, затупления резца, условий охлаждения, а также от механических свойств материала обрабатываемой детали. При обработке лезвийным инструментом - точении, фрезеровании, строгании и т. п. в зоне обработки доминирует силовой фактор, особенно это характерно для черновых этапов обработки. Окончательная величина и знак остаточных напряжений после точения зависят от степени воздействия каждой из причин, участвующих в формировании напряжений.

Влияние скорости резания при точении проявляется в изменении теплового воздействия и в изменении продолжительности теплового и силового воздействия на металл инструмента. Поэтому повышение скорости резания при точении способствует

появлению дополнительных растягивающих напряжений, которые увеличивают общую величину остаточных напряжений растяжения. Остаточные напряжения достигают величины 20-80 кг/мм² (как сжимающие, так и растягивающие) и залегают на глубине 50-100 мкм. При обработке малопластичных материалов, при которой формируются остаточные напряжения сжатия, повышение скорости резания приводит к уменьшению сжимающих и даже образованию растягивающих напряжений. При обработке пластичных материалов, воспринимающих закалку, увеличение количества теплоты в зоне резания, связанное с повышением скорости резания, может привести к закалке поверхностного слоя. Увеличение удельного объема металла поверхностного слоя при его закалке приводит к снижению остаточных напряжений растяжения, формирующихся при малых скоростях, и превращению их в напряжения сжатия при обработке на больших скоростях резания. При точении закаленных материалов увеличение нагревания поверхностного слоя при увеличении скорости резания может вызвать отпуск. Вследствие отпуска происходят структурные изменения, связанные с уменьшением удельного объема металла, что приводит к снижению остаточных напряжений сжатия. Увеличение подачи при обработке пластичных сталей, например, жаропрочных, у которых формируются остаточные растягивающие напряжения, приводит к росту пластической деформации поверхностного слоя и соответствующему росту остаточных напряжений растяжения. При точении малопластичных материалов увеличение подачи вызывает увеличение остаточных напряжений сжатия, а при обработке малопластичных закаленных сталей - их снижение. Возрастанию остаточных напряжений сжатия при точении малопластичных сталей способствует также увеличение отрицательных значений передних углов резца.

При отрицательном переднем угле и больших скоростях резания ($V > 300$ м/мин) получают сжимающие остаточные напряжения у поверхности. При некоторых условиях скоростного резания (с большими отрицательными углами) у сталей хорошо воспринимающих закалку, в поверхностном слое наблюдается переход аустенита в мартенсит. Такой переход, сопровождающийся увеличением объема, соответствует образованию сжимающих остаточных напряжений и компенсирует влияние теплового фактора.

Износ резца приводит к увеличению пластической деформации поверхностного слоя металла и глубины ее проникновения. Поэтому при точении пластичных материалов происходит увеличение остаточных напряжений растяжения, а при точении малопластичных материалов - увеличение сжимающих напряжений.

В процессе шлифования решающее влияние на образование остаточных напряжений оказывает тепловой фактор. Поэтому в поверхностном слое в процессе шлифования возникают сжимающие температурные напряжения. Указанные напряжения превосходят предел текучести материала и вызывают пластическую деформацию сжатия. После окончания процесса шлифования и установления нормальной температуры эта деформация сохраняется, что приводит к растяжению поверхности со стороны внутренних слоев, т.е. к образованию растягивающих остаточных напряжений. Пластическая деформация, связанная с усилием резания, при шлифовании имеет второстепенное значение. Изменение условий шлифования, приводящее к повышению температуры резания, приводит к росту остаточных напряжений растяжения или снижению остаточных напряжений сжатия.

Для ряда марок сталей, особенно высоколегированных, при охлаждении образуется поверхностный мартенситный слой (белый слой толщиной 0,01—0,3 мм). Мартенситное

превращение происходит при увеличении объема, что может компенсировать уменьшение объема при пластической деформации сжатия. Указанное обстоятельство может привести к образованию остаточных напряжений сжатия. Однако в практических случаях влияние температурных деформаций сказывается больше, и после шлифования и поверхностном слое наблюдаются растягивающее остаточные напряжения.

На основании ряда экспериментальных исследований можно считать, что после шлифования в поверхностных слоях возникают растягивающие остаточные напряжения $40...80 \text{ кг/мм}^2$ (на глубине $20...50 \text{ мкм}$). При ленточном шлифовании жаропрочных сплавов в поверхностных слоях создаются сжимающие остаточные напряжения порядка $40...50 \text{ кг/мм}^2$, при ручном полировании - $40...60 \text{ кг/мм}^2$. Для снятия остаточных напряжений в жаропрочных сплавах применяется специальный отжиг.

Остаточные напряжения также возрастают при увеличении сопротивления деформации при повышении твердости.

В заготовке, поступающей на металлорежущий станок, имеются внутренние напряжения, которые сохраняются при отсутствии внешних сил и потому называются остаточными. При механической обработке, когда с заготовки в виде припуска удаляют часть металла, происходит перераспределение внутренних остаточных напряжений, их временное равновесие нарушается. Основную роль здесь играют напряжения первого рода. Величина и характер распределения остаточных напряжений зависят от конфигурации заготовки, ее габаритных размеров и соотношения размеров отдельных элементов, способа получения исходной заготовки и других факторов. Большие остаточные напряжения возникают в исходных заготовках, получаемых литьем, ковкой, штамповкой, из-за неравномерного охлаждения разных элементов заготовки. В сварных, сварно-литых, сварно-штампованных конструкциях наибольшие внутренние напряжения возникают в местах сварки, где из-за местного нагрева и охлаждения происходят неоднородные объемные изменения. Структурные превращения металла и диффузионные процессы при сварке также способствуют появлению остаточных напряжений различного рода. В особо неблагоприятных случаях остаточные напряжения могут вызвать не только значительное нарушение формы заготовки - коробление, изогнутость и другое, но и трещины.

Перераспределение внутренних напряжений происходит не сразу, а постепенно, и также постепенно происходит изменение формы заготовки и готовой детали. В практике бывают случаи, когда исходная заготовка, получившая большие остаточные напряжения, проходит черновую обработку. Частично перераспределяются внутренние напряжения и деформация заготовки. Получившиеся при этом искажения формы устраняют при чистовой обработке. Готовую деталь, если она годная, ставят на машину, а через некоторое время уже при эксплуатации выясняется, что деталь быстро изнашивается, причина этого - ее деформация, которая произошла после того, как деталь полностью обработали.

Самый простой путь устранения внутренних напряжений - разделение обработки резанием на несколько этапов. На первом этапе выполняют черновую обработку, удаляя наибольшую часть припуска с поверхностей заготовки. Затем передают заготовку на получистовую обработку и заканчивают изготовление детали на третьем этапе - чистовой обработке. Так как обычно заготовки обрабатывают партиями, а черновую, получистовую и чистовую обработки ведут на разных станках, а иногда и в разных цехах, то между черновой и получистовой обработками проходит определенное время. За это время

происходит в основном перераспределение внутренних напряжений и деформация заготовки. Чем больше промежуток времени между черновой и чистовой обработками, тем меньше опасность искажения формы готовой детали.

Для мелких и средних отливок эффективным способом снятия внутренних напряжений является искусственное старение - специальный процесс термической обработки. Отливку помещают в печь, нагревают до температуры 500-600° С и выдерживают в течение 1-6 ч (чем крупнее отливка, тем больше выдержка). Затем отливку медленно охлаждают вместе с печью таким образом, чтобы все части отливки (тонкие и толстые) охлаждались равномерно. Скорость охлаждения составляет 25-75 град/ч. Когда температура отливки снизится до 200-250° С, ее вынимают из печи и окончательно охлаждают на воздухе.

Для снятия напряжений, полученных при ковке, штамповке и литье, применяют также отжиг - нагрев до температуры 400 - 600°С с выдержкой 2,5 мин на 1 мм толщины сечения заготовки, а для сварных заготовок - высокотемпературный отпуск с нагревом до 600-650° С. Отжигают также заготовки, получаемые из проката. Вследствие больших пластических деформаций при прокатке в поверхностных слоях заготовок образуются значительные растягивающие, а во внутренних слоях сжимающие напряжения. Если с такой заготовки снимать неравномерный припуск, то ее форма из-за перераспределения внутренних напряжений может измениться. Поэтому, например, после фрезерования длинных шпоночных канавок на валах, изготавливаемых из проката, может происходить искривление вала. Для исправления кривизны заготовок валов, осей, стержней, длинных планок и т.д. их правят в холодном состоянии. В процессе правки происходит упругая, а затем пластическая деформация.

Тщательная правка позволяет почти полностью устранить кривизну заготовки, вызванную действием остаточных напряжений. Но при правке в заготовке появляются новые напряжения. При дальнейшей чистовой обработке (а еще хуже - в работающей машине) эти остаточные напряжения могут вызвать новые искажения формы, поэтому для ответственных деталей правку применять нежелательно.

Состав смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС), способы их подвода в зону резания оказывают также влияние на величину и знак макронапряжений, возникающих в поверхностных слоях деталей, обработанных резанием. Применение СОТС вносит соответствующие изменения в физико-химические процессы, протекающие в зоне контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью, обуславливающие напряженное состояние поверхностных слоев. Одни и те же среды, в зависимости от метода и условий обработки, оказывают неодинаковое влияние на величину и знак остаточных напряжений. Применение СОТС может способствовать как увеличению, так и уменьшению остаточных напряжений по сравнению с обработкой без СОТС. Характер влияния СОТС на технологические макронапряжения в значительной мере зависит от количества тепла, выделяемого в зоне резания, которое определяет развитие процессов разупрочнения в поверхностном слое, а следовательно, влияет и на его напряженность.

4.3 Технологическое обеспечение структурозависимых показателей качества поверхностного слоя деталей машин при обработке поверхностным пластическим деформированием обработки.

Операции обработки методами ППД включают в технологический процесс для решения следующих задач:

- упрочнение поверхности детали при условии получения минимальной шероховатости или заданного микрорельефа;
- упрочнение детали с обеспечением максимального приращения предела выносливости, износостойкости и других эксплуатационных свойств;
- упрочнение поверхности в условиях достижения максимально возможного исправления неточностей размеров и формы детали;

Эти задачи в процессе ППД решаются изменением ряда параметров качества поверхности и свойств материала поверхностного слоя:

- формируется качественно новая макро- и микрогеометрия поверхности;
- в поверхностном слое возникают остаточные макронапряжения сжатия;
- кристаллическая решетка материала поверхностного слоя получает упругопластические искажения, приводящие к формированию остаточных макронапряжений;
- изменяется форма, размеры и ориентировка зерен, что способствует формированию текстурированного поверхностного слоя.

Эффективность упрочнения тесно связана с интенсивностью упругопластической деформации материала поверхностного слоя в процессе ППД. При ППД упругопластическая деформация может быть осуществлена двумя способами воздействия на поверхность детали. Либо твердыми телами, либо концентрированными потоками (полями) энергии.

ППД твердыми телами является наиболее распространенным способом упрочнения. Его осуществляют путем воздействия на обрабатываемую поверхность одного или нескольких обрабатывающих тел. Этот способ ППД лежит в основе целой гаммы методов, которые по характеру силового взаимодействия обрабатывающего тела с обрабатываемой поверхностью можно разделить на две большие группы: квазистатические и динамические (ударные).

Квазистатические предполагают создание деформационного усилия от обрабатывающего тела при его непрерывном контакте с деталью. Условно они отличаются от ударных методов отсутствием инерционных сил при взаимодействии обрабатывающего тела с деталью. При динамических - пластическая деформация поверхностного слоя осуществляется путем многократного ударно-импульсного воздействия обрабатывающих тел энергонесущей среды на обрабатываемую поверхность. В этом случае энергонесущая среда многократно воздействует на все обрабатываемую поверхность или ее часть, при этом сила воздействия обрабатывающих тел P в каждом цикле изменяется от нуля или от некоторого значения P_1 до максимума, а в случае локального ударного воздействия очаг деформирования может (как и в статических методах) последовательно и равномерно проходить всю обрабатываемую поверхность.

При использовании в технологических целях физико-химических явлений, поверхностная пластическая деформация осуществляется "бесконтактным способом" – путем воздействия на поверхность энергонесущей среды в виде концентрированного потока энергии. К числу таких методов ППД относятся: обработка в магнитном поле, взрывной волной, электронно-ионной и квантовой технологией, импульсными воздушными струями, барофрагментация. Характер силового воздействия на обрабатываемую поверхность при обработке этой группой методов может быть импульсным и постоянно нарастающим.

Применяемые в практике процессы ППД характеризуются наличием непрерывного или дискретного контакта. Последние, представляющие в основном группу динамических методов обработки твердыми телами, могут быть разделены на процессы с регулярным и со стохастическим формированием локальных очагов деформации (отпечатков). К числу динамических методов ППД, при обработке которыми формирование локальных очагов деформации носит регулярный характер, относятся методы обработки единичным индентором или набором инденторов. Основную группу ударных методов ППД составляют методы обработки свободно движущимися телами. Они обладают высокой деформирующей способностью, регулируемой в широких пределах энергией удара, а также пригодностью для обработки разнообразных по форме поверхностей и т.д. Стохастический характер формирования лежит в основе динамических методов обработки направленным потоком, порционными массами и с соударением частиц энергонесущей среды.

При обработке деталей свободно движущимися телами, поверхностное пластическое деформирование осуществляется в результате ударно-импульсного воздействия на обрабатываемую поверхность отдельных обрабатывающих тел, в качестве которых может быть использована стальная, чугунная, стеклянная или изготовленная из материала детали дробь различной формы, типа и размера. Применяемые для обработки деталей свободно движущимися телами установки отличаются друг от друга способом подвода энергонесущей среды в зону обработки, расходом обрабатывающих тел и СОТС в единицу времени и другими конструктивными параметрами.

Интенсивность упрочнения детали при применении методов ППД, также зависит от схемы обработки поверхностей, определяемой кинематикой относительного движения: для квазистатических методов – инструмента и детали, для динамических методов – энергонесущей среды и детали.

Таким образом, операции упрочнения ППД в общем случае определяются четырьмя основными признаками:

- 1) технологическим назначением;
- 2) методом ППД – определяющим характер силового воздействия обрабатывающих тел или энергонесущей среды на обрабатываемую поверхность;
- 3) схемой обработки детали;
- 4) типом или видом обрабатывающих тел.

Обработка ППД сопровождается сложными структурными и фазовыми превращениями, характерными для формирования поверхностного слоя. В первоначальный момент, деформирование в области плоскостей скольжения происходит искажение кристаллической решетки, в частности ее поворот, а также смещение атомов из положения устойчивого равновесия и упругие искривления плоскостей скольжения. Эти искажения вызывают появление дополнительных напряжений, остающихся после прекращения нагружения (напряжения третьего рода).

Основной причиной упрочнения является лавиноподобное развитие дислокаций — дефектов кристаллической решетки металла, скапливающихся вблизи линий сдвигов, и последующее застревание перед различного рода препятствиями, образующимися в процессе деформирования или существовавшими до него. При деформировании перенасыщенных твердых растворов частично происходит их распад, в результате которого выделяются мельчайшие частицы новых структурных образований. Последние, выделяясь на плоскости скольжения, блокируют развитие сдвигов. При деформировании

сталей с феррито-перлитной структурой распадается твердый раствор α -железа и углерода, роль «шипов» играют карбиды железа, выделяющиеся в виде очень мелких карбидных включений. Возможно и выпадение соединений азота — нитридов. Увеличение твердости при пластическом деформировании сталей со структурой мартенсита закалки объясняется частичным превращением остаточного аустенита в мартенсит.

Интенсивность упрочнения сталей тем выше, чем мягче сталь. У незакаленных сталей в результате поверхностного деформирования можно получить увеличение твердости более чем на 100%, а у закаленных - только на 10-15%. Прирост твердости определяется структурой деформируемой стали. Наибольшее повышение твердости наблюдается у сталей с аустенитной, ферритной и мартенситной структурами, наименьшее — с перлитной и сорбитной структурами. Абсолютный прирост твердости в результате составляет: для мартенситных структур - 180-320НВ; для сталей, содержащих избыточный феррит - 60-120НВ. Это связано с тем, что структурные составляющие имеют различную способность к упрочнению. Для структуры мартенсита глубина упрочненной зоны больше, чем при тех же условиях для других структур. Структуры сорбита имеют наименьшую глубину пластически деформированного слоя.

Деформационное упрочнение характеризуется увеличением пределов текучести, твердости, хрупкости и снижением пластичности. Претерпевают изменения ползучесть, внутреннее трение, электросопротивление, коэрцитивная сила, магнитная проницаемость, остаточная индукция. Эти изменения физико-механических свойств поверхностного слоя металла зависят от степени пластической деформации, и их необходимо учитывать при выборе режимов ППД для деталей различного назначения.

Увеличение концентрации точечных и линейных дефектов кристаллического строения и образование субмикроскопических (неопасных и неопасных) трещин также увеличивает удельный объем металла. Суммарное максимальное увеличение удельного объема для сталей достигает 1,1%. Это обуславливает образование в пластически деформированной зоне остаточных напряжений сжатия, которые в зависимости от материала и метода обработки достигают 1200-1500 МПа; глубина залегания напряжений обычно на 10-15% превышает глубину слоя с повышенной твердостью. Максимальное напряжение чаще всего непосредственно на поверхности или на некотором расстоянии от поверхности, что обусловлено тепловыми явлениями в процессе ППД. При использовании в процессе ППД СОТС, подслоный максимум практически исчезает [16].

Характер распределения остаточных напряжений по глубине упрочненного поверхностного слоя, как правило, имеет вид представленный на рис. 4.8. Различные технологические режимы влияют на глубину залегания остаточных напряжений, которая увеличивается пропорционально росту размеров пластического отпечатка. На интенсивность сжимающих напряжений, основное влияние оказывает скорость пластической деформации и продолжительность обработки.

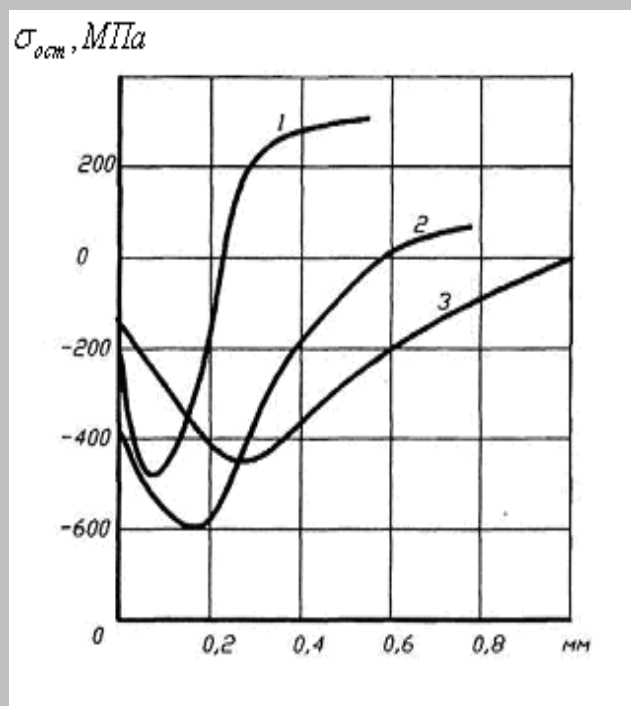


Рис. 4.8. Эпюры остаточных напряжений по глубине упрочненного слоя в образцах из стали 18Х2Н4ВА после: 1- дробеструйной обработки; 2- центробежно-шариковой обработки; 3- раскатывания.

Увеличение предела усталости определяется не столько методом ППД, сколько технологическими режимами, обуславливающими увеличение глубины и интенсивности пластически деформированного поверхностного слоя.

Процесс обработки деталей методами ППД сопровождается выделением теплоты, которая нагревает обрабатываемую деталь, обрабатывающие тела, а также окружающую среду. Теплота деформирования генерируется в очаге деформирования, теплота трения – непосредственно на поверхности контакта. Так как на размеры очага деформирования влияют многие параметры обработки, то время нагрева зависит не только от скорости, но и от давления и размеров обрабатывающих тел. При интенсивных режимах обработки локальные участки поверхностных слоев нагреваются до различной температуры: при обкатывании – до 300-400 °С, при выглаживании – до 600-700 °С, при ударных методах – до 800-1000 °С. При этом, использование СОТС позволяет снизить температуру в зоне деформирования в несколько раз.

Тепловой эффект присущий ППД может вызывать термопластическое деформирование и другие явления, снижающие эффект упрочнения. Термопластическое деформирование приводит к резкому спаду остаточных сжимающих напряжений на поверхности, а в некоторых случаях – к превращению их в растягивающие. Могут образовываться также вторичные структуры, снижающие эксплуатационные свойства поверхности. Стыки структур являются концентраторами напряжений, что приводит к зарождению усталостных трещин. Необходимо устанавливать такие силовые параметры обработки конкретных материалов, которые не вызывают повышения температуры поверхности более допустимой.

Характер ударного силового воздействия определяется энергией удара, развиваемой обрабатывающими телами и скоростью деформирования. Обрабатываемое тело, помимо полезной работы деформирования, затрачивает энергию на упругий отскок и

на преодоление сил трения. Поэтому рекомендуется потенциальную энергию обрабатываемого тела, например, при обработке конструкционных сталей принимать на 15-20% больше полезной работы деформирования.

При ударном силовом нагружении обрабатываемой поверхности по сравнению с квазистатическим нагружением, в зависимости от твердости обрабатываемого материала требуется в 1,7-2,8 раза больше энергии.

Увеличение скорости нагружения до 100 м/с приводит к повышению предела текучести, например, для железа армко – в 3,4 раза, для стали 45 – в 3 раза, для Ст3 – в 2,8 раза. Предел прочности для углеродистых термобработанных сталей возрастает на 43 %, для армко-железа – 55 %, т.е. с увеличением твердости материала интенсивность изменения этих характеристик уменьшается. Меньше всего указанные характеристики изменяются для высокопрочных сталей.

При завышенных силовых параметрах обработки ППД может происходить разрушение поверхностного слоя сопровождающееся появлением опасных микротрещин, образованием частичек отслаивающегося металла, при этом поверхностные зерна сплющиваются так, что становятся почти неразличимыми, увеличивается шероховатость поверхности. Напряженное состояние упрочненного слоя можно частично или полностью снять путем отжига. Перенаклеп поверхностного слоя в процессе ППД – необратимый процесс, при котором нагрев не восстанавливает исходную структуру металла и его механические свойства.

4.4 Технологическое обеспечение структурозависимых показателей качества поверхностного слоя деталей машин при термических и физико-химических методах обработки

Среди физико-химических методов обработки, основанных на воздействии на поверхность детали потоков частиц и квантов с высокой энергией, особое место занимают вакуумные ионно-плазменные методы. Характерной их чертой является прямое преобразование эклектической энергии в энергию технологического воздействия, основанной на структурно-фазовых превращениях в осажденном на поверхности конденсате или в самом поверхностном слое детали, помещенной в вакуумную камеру.

Основным достоинством данных методов является возможность создания весьма высокого уровня физико-механических свойств материалов в тонких поверхностных слоях, нанесение плотных покрытий из тугоплавких химических соединений, а также алмазоподобных, которые невозможно получить традиционными методами.

Кроме того, эти методы позволяют: обеспечивать высокую адгезию покрытия к подложке; равномерность покрытия по толщине на большой площади; варьировать состав покрытия в широком диапазоне, в пределах одного технологического цикла; получить низкую шероховатость поверхности покрытия; экологическую чистоту производственного цикла. В настоящее время разработано большое число очень высоко эффективных методов нанесения защитных покрытий и модифицирования поверхностных слоев.

К методам вакуумной ионно-плазменной технологии относят:

1. Модифицирование поверхностных слоев:

- ионно-диффузионное насыщение (ионное азотирование, науглероживание, борирование и др.);
- ионное (плазменное) травление (очистка);
- ионная имплантация (внедрение);

- отжиг в тлеющем разряде;
- 2. Нанесение покрытий:
- полимеризация в тлеющем разряде;
- ионное осаждение (триодной распылительной системе, диодной распылительной системе, с использованием разряда в полом катоде);
- электродуговое испарение;
- ионно-кластерный метод;
- катодное распыление (на постоянном токе, высокочастотное);
- химическое осаждение в плазме тлеющего разряда.

Современные вакуумные ионно-плазменные методы упрочнения (модифицирование) поверхностей деталей машин включают следующие этапы:

- генерацию (образование) корпускулярного потока вещества;
- его активизацию, ускорение и фокусировку;
- конденсацию и внедрение в поверхность деталей (подложек).

Генерация корпускулярного потока вещества возможна его испарением (сублимацией) и распылением. Испарение - это переход конденсированной фазы в пар осуществляется в результате подвода тепловой энергии к испаряемому веществу. Твердые вещества обычно при нагревании расплавляются, а затем переходят в газообразное состояние. Некоторые вещества переходят в газообразное состояние минуя жидкую фазу. Такой процесс называется сублимацией.

Нагрев испаряемого вещества может осуществляться:

- за счет выделения джоулева тепла при прохождении электрического тока через испаряемый материал или через испаритель;
- в результате бомбардировки поверхности металла ускоренным потоком электронов (электронно-лучевой нагрев) или квантами электромагнитного излучения (лазерный нагрев);
- высокочастотным электрическим магнитным полем (индукционный нагрев);
- электрической дугой.

Выбор способа нагрева и вид испарения зависят от природы испаряемого материала, его исходной формы (гранулы, порошок, проволока), требуемой скорости испарения, постоянства во времени и т.д. Наибольшее распространение получил нагрев при помощи электронной бомбардировки, что позволяет достигать температуры 4000 градусов Цельсия и высокой плотности энергии в луче. Электронно-лучевой способ нагрева состоит в, что на изделие направляют поток электронов от катода, ускоренных электрическим полем до энергии 5...25 кэВ. Поток электронов (электронный луч) получают с помощью электронно-лучевых пушек.

В результате образования активированного корпускулярного потока в контакт с подложкой металла детали входят нейтральные частицы (возбужденные и невозбужденные) с высокой энергией и ионы. Процесс взаимодействия такого сложного по составу потока с поверхностью металла сводится к протеканию взаимосвязанных физических явлений: конденсации, внедрения и распыления.

Ионное распыление. Ионные распылители разделяют на две группы:

- плазменные, в которых мишень находится в газоразрядной плазме, создаваемой с помощью тлеющего, дугового и высокочастотного разряда. Распыление происходит в результате бомбардировки мишени ионами, извлекаемыми из плазмы;

- автономные источники без фокусировки и с фокусировкой ионных пучков, бомбардирующих мишень (заготовку).

В наиболее простом случае система распыления состоит из двух электродов, помещенных в вакуумную камеру (рис. 3.5). Распыляемую мишень из наносимого материала располагают на катоде. На другом электроде на расстоянии в несколько сантиметров от катода, устанавливают детали (подложки). Камеру вакуумируют, наполняют рабочим газом (чаще всего аргоном) до давления 1,33Па, зажигают газоразрядную плазму и бомбардировкой ионами производят очистку изделия от поверхностных загрязнений, далее отрицательный потенциал прикладывают к мишени и распыляют ее. Распыляемые частицы движутся через плазму разряда, осаждаются на деталях и образуют покрытие. Большая часть энергии ионов, бомбардирующих мишень (до 25%) переходит в тепло, которое отводится водой, охлаждающей катод. Основным достоинством способа является возможность получения покрытий из тугоплавких металлов, сплавов и химических соединений.

Магнетронное распыление. Нанесение покрытий в вакууме с помощью магнетронных систем заключается в распылении твердой мишени наносимого материала ионами инертного газа, образующимися в плазме аномального тлеющего разряда при наложении на него магнитного поля, силовые линии которого ортогонально пересекают силовые линии магнитного поля (рис. 3.6).

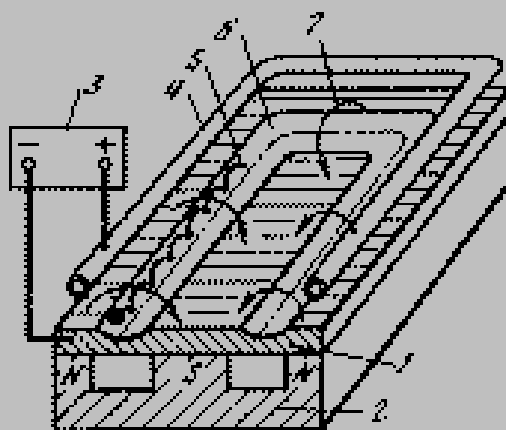


Рис. 3.6. Схема магнетронной распылительной системы с плоской мишенью: 1- катод (мишень); 2- магнитная система; 3- источник питания; 4- анод; 5- траектория движения электрона; 6- зона распыления; 7- силовая линия магнитного поля.

Основными элементами магнетрона является катод (мишень), анод и магнитная система. Силовые линии магнитного поля замыкаются между полюсами магнитной системы. При подаче постоянного напряжения между мишенью (отрицательный потенциал) и анодом (положительный потенциал) возникает неоднородное электрическое поле и возбуждается тлеющий разряд. Наличие замкнутого магнитного поля к распыляемой поверхности мишени позволяет локализовать плазму разряда непосредственно у мишени. Эмитированные с катода под действием ионной бомбардировки электроны захватываются магнитным полем, и им сообщается сложное циклоидальное движение по замкнутым траекториям у поверхностей мишени. Электроны оказываются как бы в ловушке, создаваемой с одной стороны магнитным полем, возвращающим их на катод, а с другой стороны – поверхностью мишени, их отталкивающей. Электрон циркулирует в этой ловушке до тех пор, пока не произойдет несколько ионизирующих столкновений с атомами рабочего газа, в результате которых он потеряет полученную от электрического поля энергию. Таким образом, большая часть энергии электрона, прежде чем он попадает на анод, используется на ионизацию и

возбуждение, что значительно увеличивает эффективность процесса ионизации и приводит к возрастанию концентрации положительных ионов у поверхности мишени и росту скорости осаждения покрытия.

Ионное осаждение покрытий. Этот способ нашел применение в реновационном производстве для получения износостойких и коррозионностойких покрытий как из чистых металлов, так и из соединений. К методам ионного осаждения покрытий относят методы, в которых осаждаемая пленка подвергается интенсивному воздействию ионного компонента корпускулярного потока, обеспечивающего изменения как в структуре и свойствах детали, так и самого покрытия. Такой результат возможен либо при высокой степени ионизации корпускулярного потока (газообразного или металлического) осаждаемого вещества, либо при высокой энергии ионного компонента корпускулярного потока. По типу источника генерации металлического компонента потока различают ионно-термические системы распыления и холодные системы. В первых системах перевод переносимого материала из твердого в парообразное состояние осуществляется в результате термического нагрева, во втором - распылением с поверхности интегрально холодной мишени (катода).

Эти методы позволяют получать покрытия с высокими служебными характеристиками кристаллизации пленок и их свойствами.

Ионно-диффузионное насыщение. Этот метод наиболее широко применяется при азотировании сталей и металлов. Преимущества перед печами обычного газового азотирования состоит в сокращении длительности цикла в 3...5 раз; уменьшении деформации восстанавливаемых деталей в 3...5 раз; в возможности проведения регулируемых процессов азотирования с получением слоев с заданным составом и структурой; в возможности уменьшения температуры процесса азотирования до 350...400⁰С, что позволяет избежать разупрочнения материалы сердцевины изделий; в уменьшении хрупкости слоя и повышении его служебных характеристик; в простоте защиты отдельных участков деталей от азотирования; в устранении опасности взрыва печи; в снижении удельных расходов электрической энергии в 1,5...2 раза и рабочего газа в 30...50 раз; в улучшении условий труда термистов.

Система ионного насыщения представляет собой вакуумную камеру, в электрическом плане реализующую двухэлектродную схему: катод-электрод с деталями; второй электрод (анод) - заземленный корпус вакуумной камеры. Для проведения процесса ионного насыщения в вакуумную камеру подается легирующий материал (элемент или химическое соединение) в газообразном (парообразном) состоянии, а к деталям прикладывается отрицательный потенциал - 300...1000В. Поверхность изделия бомбардируется положительными ионами легирующего элемента из газоразрядной плазмы, что позволяет значительно сократить длительность процесса насыщения поверхности. К недостаткам метода можно отнести невозможность ускорения процесса путем увеличения плотности ионного потока.

4.5 Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств поверхности детали при нанесении покрытий

Покрытие — искусственно сформированный на поверхности изделия или конструкции слой, отличающийся от материала основы по составу и физико-химическим свойствам.

Защитные покрытия делятся на покрытия постоянного действия, временного действия и периодического действия (например, воски). Наибольшее распространение получили методы нанесения покрытий постоянного действия и специальной электрохимической и химической обработки поверхностей металлов.

По методу нанесения защитные покрытия делят на физические, электрохимические и химические. К физическим относят покрытия, полученные методами конденсации, плакирования, диффузии, механическими, катодного распыления, металлизации, вжигания, горячей обработки. В производстве металлоконструкций их используют ограниченно (за исключением методов плакирования и механического). Например, нанесение полимерных покрытий осуществляют напылением порошков в вакууме при нагреве деталей в тлеющем разряде, или в электрическом поле с механическим перемешиванием порошка, или полимеризацией тетрафторэтилена под действием ультрафиолетового облучения в присутствии закиси азота. К электрохимическим относят покрытия электролитические на катоде, анодного оксидирования (анодирования). Они получили широкое распространение, хотя имеют существенные недостатки из-за несовершенства используемых растворов. Самый крупный недостаток катодного восстановления – неравномерность покрытия по поверхности деталей сложной конфигурации. Химические методы нанесения покрытий лишены этого недостатка, однако по производительности уступают электрохимическим.

По характеру расположения на поверхности покрытия подразделяются на наслоенные и диффузионные (или внедренные).

Наслоенное покрытие — покрытие, сформированное на внешней поверхности изделия или конструкции, имеющее четкую границу раздела с основной.

Диффузионное покрытие — покрытие, сформированное за счет внедрения в материал основы без существенного изменения начальных размеров изделия.

Возможны покрытия, имеющие промежуточный характер (диффузионно-наслоенные).

Существующие методы нанесения покрытий делятся на следующие основные группы: химическое осаждение, электрохимическое осаждение, газотермическое напыление, вакуумное напыление, диффузионное насыщение.

Химическое осаждение — получение покрытий из водных растворов солей, основанное на реакциях восстановления.

Электрохимическое осаждение — получение покрытий на металлах из растворов или расплавов электролитов под действием электрического тока.

Газотермическое напыление — получение покрытия из частиц дисперсного материала, нагретых и ускоренных с помощью высокотемпературной газовой струи.

Вакуумное напыление — получение покрытия из парогазовой фазы с использованием контролируемых процессов испарения, синтеза, конденсации и сорбции вещества покрытия в виде отдельных атомов и молекул в вакууме.

Диффузионное насыщение — получение покрытия путем легирования металлами и неметаллами поверхностного слоя основного материала при нагревании в среде, содержащей образующие покрытие элементы.

Среди методов нанесения защитных покрытий, основанных на воздействии на поверхность детали потоков частиц и квантов с высокой энергией, большое внимание привлекают вакуумные ионно-плазменные методы. Характерной их чертой является прямое преобразование эклектической энергии в энергию технологического воздействия,

основанной на структурно-фазовых превращениях в осажденном на поверхности конденсате или в самом поверхностном слое детали, помещенной в вакуумную камеру.

Основным достоинством данных методов является возможность создания весьма высокого уровня физико-механических свойств материалов в тонких поверхностных слоях, нанесение плотных покрытий из тугоплавких химических соединений, а также алмазоподобных, которые невозможно получить традиционными методами.

Кроме того, эти методы позволяют: обеспечивать высокую адгезию покрытия к подложке; равномерность покрытия по толщине на большой площади; варьировать состав покрытия в широком диапазоне, в пределах одного технологического цикла; получить низкую шероховатость поверхности покрытия; экологическую чистоту производственного цикла. В настоящее время разработано большое число очень высоко эффективных методов нанесения защитных покрытий и модифицирования поверхностных слоев.

Эксплуатационные характеристики покрытий:

Износостойкие покрытия

- стойкие в условиях адгезионного износа (схватывание) (мягкие и твердые подшипниковые покрытия);
- стойкие в условиях абразивного износа (абразивными частицами при $T < 540^{\circ}\text{C}$; абразивными частицами (при $540 < T < 850^{\circ}\text{C}$; твердыми поверхностями при $T < 540^{\circ}\text{C}$; твердыми поверхностями при $540 < T < 850^{\circ}\text{C}$; волокнами и нитями);
- стойкие в условиях усталостного износа поверхности (при циклических нагрузках; при фреттинг-коррозии $T < 540^{\circ}\text{C}$; при фреттинг коррозии $540 < T < 850^{\circ}\text{C}$);
- стойкие в условиях эрозионного износа (при $T < 540^{\circ}\text{C}$; при $540 < T < 850^{\circ}\text{C}$).

Тепло- и жаростойкие высокотемпературные покрытия

- для защиты в окисляющих атмосферах при $T < 950^{\circ}\text{C}$;
- для защиты от агрессивных газовых сред (стойкие к корродирующим газам) при $T < 950^{\circ}\text{C}$;
- для защиты от эрозии при $T > 850^{\circ}\text{C}$;
- для защиты от воздействия расплавов (цинка, алюминия, чугуна и стали, меди);
- для тепловых барьеров.

Коррозионностойкие покрытия

- стойкие к атмосферной коррозии;
- стойкие в воде и водных растворах.

Покрытия для саморегулирования зазоров в сопрягаемых деталях машин

- изнашиваемые;
- изнашивающие.

Например, ионное легирование (имплантация) существенно снижает износ и трение, увеличивает антикоррозионные свойства металла. Кроме того, при нанесении покрытий в кристаллической решетке инициируется смещение атомов, приводящих к образованию большого количества дефектов кристаллической решетки. Толщина этого насыщенного дефектами и вследствие этого упрочненного слоя во много раз превышает глубину проникновения ионов. Толщина модифицированного слоя составляет несколько микрон.

Часть методов нанесения покрытий была рассмотрена ранее. Рассмотрим еще несколько разновидностей, обеспечивающих повышение эксплуатационных свойств поверхностей деталей машин.

Газодинамическое нанесение покрытий. Технология включает в себя нагрев сжатого газа (воздуха), подачу его в сверхзвуковое сопло и формирование в этом сопле сверхзвукового воздушного потока, подачу в этот поток порошкового материала, ускорение этого материала в сопле сверхзвуковым потоком воздуха и направление его на поверхность обрабатываемого реноизделия.

В качестве порошковых материалов используются порошки металлов, сплавов или их механические смеси в добавке с керамическими порошками. При этом путем изменения режимов работы оборудования можно либо проводить эрозионную обработку поверхности изделия, либо наносить металлические покрытия требуемых составов. Изменением режимов можно также менять пористость и толщину напыляемого покрытия.

В наиболее распространенных газотермических методах нанесения покрытий для формирования покрытий из потока частиц необходимо, чтобы падающие на подложку частицы имели высокую температуру (обычно выше температуры плавления материала). В данном случае с твердой подложкой взаимодействуют частицы, находящиеся в нерасплавленном состоянии, но обладающие очень высокой скоростью. Ускорение частиц покрытия до нужных скоростей осуществляется сверхзвуковым воздушным потоком с помощью специальных установок. Закрепление твердых металлических частиц, обладающих большой кинетической энергией, на поверхность подложки происходит в процессе высокоскоростного удара.

Нанесение полимерных покрытий

Пластмассы наносят на поверхности деталей для восстановления их размеров, повышения износостойкости и улучшения герметизации. При этом покрытие из пластмассы снижает шум от трения и повышает коррозионную стойкость изделия. Тонкий слой пластмассы практически не ухудшает прочностных показателей металла и придает восстанавливаемой детали податливость, т.е. способность принимать форму сопряженной детали, что приводит к резкому увеличению площади контакта. Пластмассы наносят литьем под давлением, горячим прессованием, вихревым, газопламенным и центробежными способами.

Акриловые пластмассы. При восстановлении реноизделий широко применяют акриловые пластмассы, содержащие в качестве связующих материалов акриловые смолы — продукты полимеризации метилметакрилата и сополимеризации метилметакрилата со стиролом. К ним относят: акрилат АТС-1, бутакрил, эпоксидно-акриловые пластмассы СХЭ-2 и СХЭ-3. Эти термопластические быстротвердеющие пластмассы холодного отверждения получают смешиванием порошка и жидкости. Изготовленная масса, имеющая консистенцию сметаны, затвердевает без подогрева и давления. Затвердевшая пластмасса износостойка, хорошо работает в паре с чугуном, сталью, бронзой, коэффициент трения при отсутствии смазочного материала 0,20—0,18, а при введении в композицию требуемого количества антифрикционных добавок уменьшается до 0,143. Пластмассы с такими добавками могут работать без смазки. Вязкость пластмасс изменяют в зависимости от их назначения. Для этого в раствор пластмассы вводят порошкообразные, волокнистые и слоистые наполнители из металлических и неметаллических материалов. Затвердевшая пластмасса стойка к щелочам любой концентрации, бензину, скипидару, пресной и морской воде, минеральным и растительным маслам. Слой пластмассы можно удалить нагреванием до 150...200 °С и дальнейшим выжиганием или обработкой резанием.

Такие пластмассы используют при восстановлении изношенных реноизделий в качестве компенсатора износа для восстановления нарушенных размерных цепей станков и машин. С помощью пластмасс восстанавливают: круговые направляющие станин карусельных станков, направляющие кареток токарных, фрезерных, расточных, зубофрезерных и других станков; регулировочные клинья и прижимные планки механизмов всех видов оборудования, в том числе механических прессов. Их также используют для ремонта подшипников шпинделей револьверных головок токарно-револьверных станков; отверстий под пиноль задней бабки; резьбы гаек ходовых винтов, втулок, посадочных мест зубчатых колес и шкивов; деталей гидронасосов; кулисных механизмов и других деталей металлорежущего оборудования.

Для повышения эксплуатационных свойств (уменьшения коэффициента трения и увеличения износостойкости) в пластмассу вводят (до 10 %, массовая доля) порошок графита. Однако при этом ухудшаются адгезионные свойства раствора пластмассы. Чтобы использовать хорошие адгезионные качества ненаполненной пластмассы и повышенные эксплуатационные свойства раствора, содержащего антифрикционные наполнители, направляющие крупных металлорежущих станков (со слоем пластмассы толщиной более 2 мм) ремонтируют двухступенчатым методом. Восстанавливаемая поверхность покрывается слоем раствора пластмасс СХЭ-2и СХЭ-3 (подложка) без наполнителя, обладающей максимальной адгезией.

Пластмасса обладает хорошими антифрикционными свойствами, эластична и влагонепроницаема, не растворяется в бензине, керосине и маслах. Коэффициент трения в паре со сталью без смазочного материала 0,02. Пластмасса обладает высокой адгезией к металлу, что позволяет успешно применять эпоксидно-эпоксидные композиции для восстановления подшипников скольжения.

Нанесение гальванических покрытий

Наиболее распространены следующие способы нанесения гальванических покрытий: электролитическое хромирование, электролитическое железнение, химическое никелирование, электроконтактное цинкование.

Электролитическое хромирование. Хромирование подразделяют на: коррозионно-стойкое, износоустойчивое, пористое декоративное.

Покрытия электролитическим хромом получают при осаждении хрома из водных растворов в результате прохождения через раствор электрического тока. Качество хромового покрытия в основном зависит от состава электролита, плотности тока, температуры электролита и интенсивности его перемешивания в ванне. Изменяя указанные элементы технологического процесса и время осаждения, получают покрытия разной толщины с различными физико-механическими свойствами и равномерностью. Основными составляющими электролитов являются хромовый ангидрид и серная кислота.

Обработку резанием можно выполнять перед анодным травлением или после него. На шлифованной поверхности получают более равномерную сетку и одинаковую ширину каналов. Выбор типа хромового покрытия зависит от условий эксплуатации деталей. Так, например, покрытие с пористостью в виде частой сетки целесообразно применять для поршневых колец цилиндров. Такая пористость лучше способствует притирке колец к поверхности цилиндров. Однако поверхность цилиндров лучше работает при применении хромированных поршневых колец с редкой сеткой каналов. При электроосаждении периодическое изменение направления постоянного тока существенно изменяет некоторые свойства покрытий. Одна из характерных особенностей хромирования с

применением реверсирования тока — возможность получения покрытия толщиной 300 мкм и более с малыми внутренними напряжениями.

Хромирование проводят при следующем режиме: температура электролита 50...60°C, катодная плотность тока 60...120 А/дм², длительность катодного периода 1...5 мин, длительность анодного периода 5...25 с. При периодических изменениях направления тока применяется электролит, содержащий 200...250 г/л хромового ангидрида CrO₃ и 2...2,5 г/л серной кислоты Na₂SO₄, или саморегулирующийся электролит. Реверсирование позволяет ускорить процесс осаждения хрома в 1,5...2 раза по сравнению с обычными режимами. Качественные и количественные изменения в процессе хромирования возможны из-за применения тока высокой плотности, при котором выход хрома возрастает. С увеличением скорости протекания электролита от 0 до 200 см/с микротвердость осажденного металла повышается от 7000 до 10 000 МПа при ведении процесса с плотностью тока 45 А/дм² и температуре электролита 45 °С.

Многослойные электролитические покрытия получают, последовательно наращивая на детали разные металлические покрытия в различном сочетании. К типу многослойных покрытий может быть отнесено и так называемое двухслойное хромовое покрытие. Последнее получают при нанесении различных осадков хрома с изменяющимися свойствами. Если необходимо защитить деталь от коррозии при одновременном увеличении ее износостойкости, наносят два слоя хрома: нижний — беспористый молочный и верхний — блестящий. Слой молочного хрома толщиной 15 мкм осаждают при температуре 70 °С и плотности тока 30 А/дм². Температура электролита 50°C, плотность тока 50 А/дм². Хромирование производят в двух ваннах с электролитами одинакового состава (250 г/л хромового ангидрида и 2,5 г/л серной кислоты).

При изготовлении деталей с хромовым покрытием и износе поверхностей трущихся деталей возможны повреждения защитного слоя.

Электролитическое железнение. При железнении, как и при других электролитических процессах, состав и свойства осажденного металла зависят от состава электролита и режимов наращивания. Процесс покрытия электролитическим железом осуществляют с использованием растворимых (стальных) и нерастворимых (угольных) электродов. Электролит для железнения необходимо выбирать с учетом возможности подбора соответствующих материалов для изготовления ванн. Перед помещением в ванну деталей, подвергающихся железнению в горячих электролитах, необходимо производить кратковременный их прогрев (до температуры электролиза) в течение 3...5 мин до включения тока.

Химическое никелирование. Химическое никелирование используют при наращивании равномерных по толщине покрытий на деталях из стали, меди, латуни, никеля и алюминия. Получение покрытий при химическом никелировании основано на восстановлении гипофосфитом ионов никеля из водных растворов солей этого металла. В результате реакции на поверхности наращиваемых деталей осаждается покрытие, состоящее из никеля и фосфора. Содержание фосфора в никелевых покрытиях зависит от режима технологического процесса и колеблется от 5 до 13 %, при этом в поверхностном слое микротвердость 3500...5000 МПа, которая растет с увеличением содержания фосфора в осадке. Термическая обработка улучшает также прочность сцепления поверхности наращиваемой детали с покрытием, которая после осаждения равна примерно 35 МПа, а после нагрева до 200...250 °С в течение 40...60 мин 280 МПа.

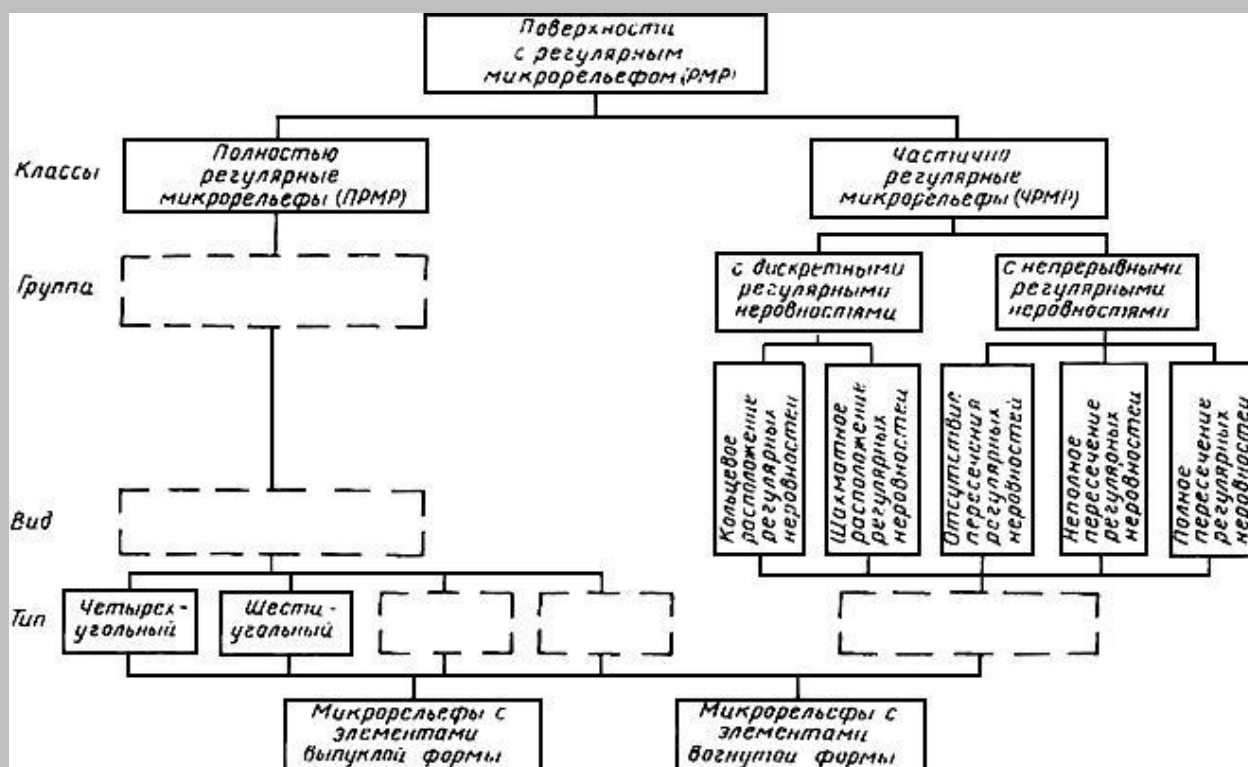
Наращивание химического никеля осуществляется как в щелочных, так и в кислых растворах. Щелочные растворы характеризуются лучшими технико-экономическими показателями по сравнению с кислыми. Скорость наращивания покрытия при химическом никелировании в этих растворах может быть постоянной и поддерживаться на уровне 10...12 мкм/ч никеля, гипофосфита и раствора аммиака в соответствии с заданной рецептурой. Необходимо поддерживать величину pH в пределах 8,5...8,7.

Электроконтактное цинкование (натираие). Цинкование проводят в электролите, содержащем, г/л: сернокислого цинка 280...300, борной кислоты 20...40. Процесс начинают вести при плотности тока 30...50 А/дм². Скорость перемещения анодного тампона относительно покрываемой поверхности 10 м/мин. Обычно используют размерное цинкование, т.е. покрытые поверхности не обрабатывают резанием. При цинковании с применением периодического тока свойства покрытий улучшаются, а процесс интенсифицируется в 2...3 раза

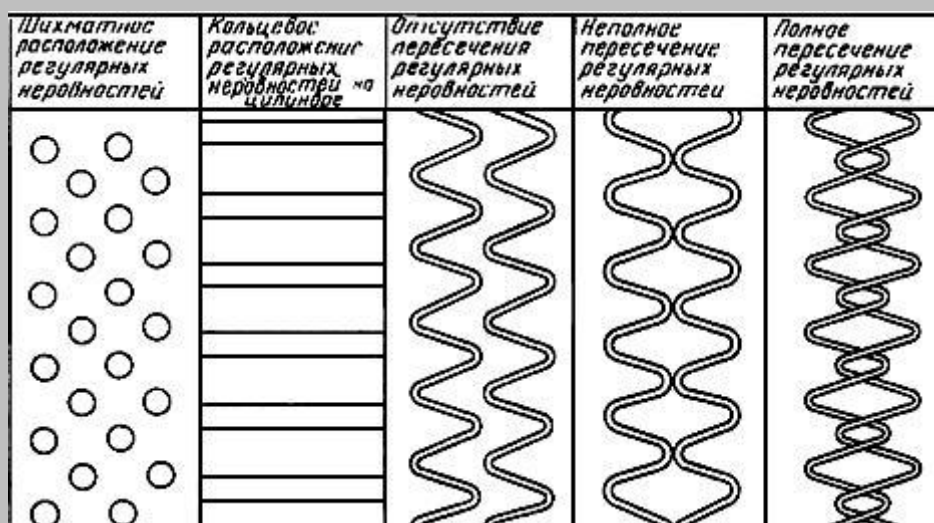
4.6 Технологическое создание закономерно изменяющегося качества поверхностного слоя деталей

ГОСТ 24773-81 дает следующую классификацию РМР и ЧРМР (рисунок).

После обработки ППД или лезвийной обработки на поверхности может образовываться стохастический микрорельеф, частично-регулярный микрорельеф (ЧРМР), полностью регулярный микрорельеф (ПРМР). Каждый из этих микрорельефов по-своему влияет на эксплуатационные свойства поверхностей деталей машин. При использовании методов ППД на свойства микрорельефа накладываются еще и упрочнение и формирование сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое, происходит залечивание микротрещин. Например при виброобкатывании формируется очагово упрочненный поверхностный слой, сочетающий высокую износостойкость (за счет вибрационного ударного воздействия) и достаточно высокую пластичность (за счет сохранения пластических свойств материала между очагами упрочнения).



Виды ЧРМР



Рисунок

После токарной обработки на поверхности детали образуется регулярный микрорельеф, представляющий собой выступы и впадины, которые копируют геометрию режущей части инструмента. Аналогичный микрорельеф получают после строгания и некоторых видов фрезерования. После фрезерования торцовыми фрезами получают частично-регулярный микрорельеф. Такие рельефы характеризуются разностью эксплуатационных свойств по различным направлениям. Например, поверхность, полученная строганием имеет различную износостойкость при различном направлении взаимного перемещения контактирующих деталей, и это надо учитывать при проектировании операций механической обработки поверхностей деталей.

Методами ППД можно обеспечить любой из представленных в классификации ЧРМР. Шахматное расположение регулярных неровностей можно обеспечить чеканкой (шаг неровностей обеспечивается подачей и частотой вращения (или перемещения) детали. Применяемое оборудование - в основном универсальное оборудование - токарные, фрезерные и др. станки), пересекающийся или непересекающийся ЧРМР можно получить накатыванием, обкатыванием, раскатыванием, виброобкаткой и др. (шаг и амплитуда неровностей обеспечивается подачей и частотой вращения (или перемещения) детали. Применяемое оборудование - в основном универсальное оборудование - токарные, фрезерные, шлифовальные и др. станки).

Рассмотри некоторые из разновидностей методов формирования РМР и ЧРМР.

Вибрационное накатывание. Вибрационное накатывание – накатывание при вибрации инструмента в направлении, касательном к поверхности деформируемого материала.

В отличие от идеальной, задаваемой на чертеже, реальная поверхность деталей никогда не бывает абсолютно гладкой, а всегда имеет шероховатости, образующие ее микрорельеф. Характер микрорельефа (размеры, форма, взаиморасположение микронеровностей) определяется способом и условиями обработки поверхности (рис. 4.30).

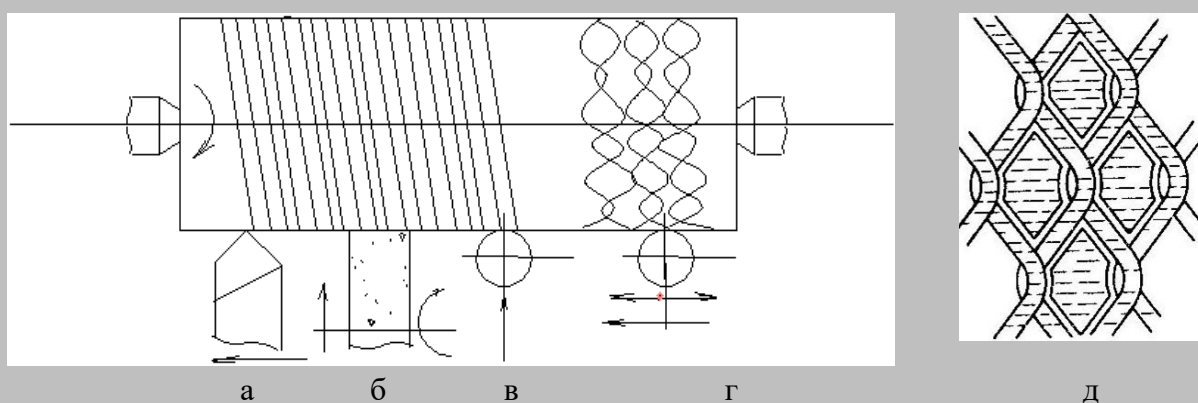


Рис. 4.30. Схема образования следов инструмента при различных методах обработки: а – точение; б – шлифование; в – обкатывание; г – вибрационное обкатывание; д - внешний вид виброобкатанной поверхности.

При вибрационном обкатывании траектория движения инструмента представляет собой синусоиду (без учета перемещения в направлении подачи S), амплитуда которой равна величине вибрации шара $2l$, а длина волны λ зависит от соотношения между числом двойных ходов инструмента $n_{\text{дв.ход}}$ и частотой вращения заготовки n_z . отношение $\frac{n_{\text{дв.ход}}}{n_z} = j$ является основным параметром, определяющим характер взаиморасположения выдавливаемых канавок в направлении вращения заготовки (рис. 4.30,г).

К основным преимуществам способа вибрационного накатывания можно отнести возможность создания тонкорегулируемого микрорельефа поверхности и повышение производительности обработки. Наибольшее применение способ вибронакатывания получил для обработки наружных и внутренних цилиндрических поверхностей деталей – тел вращения.

Большинство процессов обработки ППД отличается несложной кинематикой движения инструмента и характеризуется простотой и однообразием направлений следов обработки на поверхности детали. В результате ППД изменяются не только размеры заготовки, шероховатость поверхности (формируемый микрорельеф поверхности), но и физико-механические свойства периферийного слоя металла с образованием в нем остаточных напряжений (в основном сжимающих). Основным назначением процессов упрочняющего ППД является повышение несущей способности поверхностного слоя деталей.

Упрочняющее накатывание. Упрочняющее накатывание – это накатывание, при котором происходит поверхностное упрочнение. Накатывание по выпуклой или плоской поверхности материала называется поверхностным обкатыванием. Обкатку выпуклых или плоских деталей производят роликами или шариками (одним или несколькими), имеющими разные рабочие профили (рис.4.31). Обкатка осуществляется продольным перемещением ролика или шарика по обрабатываемой поверхности с нагружением его определенной силой или только нагружением без продольного перемещения. В результате обкатки в значительной степени повышается долговечность деталей, работающих в условиях циклических нагрузжений. При обкатке в зависимости от ее режима может быть снижена или повышена шероховатость поверхности или сформирован регулярный или частично-регулярный микрорельеф.

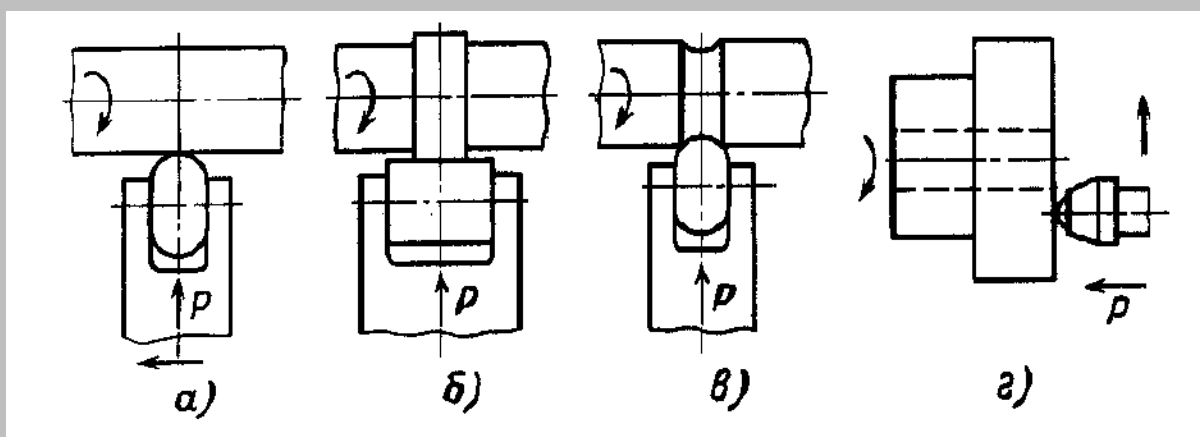


Рис. 4.31. Схемы процесса упрочняющего обкатывания

Наряду с упрочняющей широкое применение получает упрочняюще-сглаживающая обкатка, при которой снижается шероховатость обрабатываемой поверхности до $Ra=0,040...0,160$ мкм, что в ряде случаев позволяет изменить чистовое шлифование обкаткой роликами.

Влияние режима обкатки (усилия на ролик, подачи, скорости и числа проходов) на качество обработки зависит от свойств обрабатываемых материалов и назначения обкатки (сглаживающая или упрочняющая обработка).

Наиболее широко упрочняющую обкатку роликами применяют для упрочнения крупных деталей – локомотивных и вагонных осей, торсионных валов, зубчатых колес и других деталей. Особая эффективность упрочнения крупных деталей объясняется возможностью получать в процессе обкатки большую глубину (до 35 мм) и высокую степень наклепа. Например, обкатка подступичной части осей вагонов при глубине наклепа 13...19 мм увеличивает срок их службы в 25 раз.

5.1 Структурные составляющие технологической операции, обеспечивающей заданные показатели качества

Технологической операцией называется часть технологического процесса, выполняемая на одном рабочем месте и охватывающая все последовательные действия рабочего (или группы рабочих) и станка по обработке заготовки (одной или нескольких одновременно). Выбор плана изготовления детали, маршрутов обработки отдельных поверхностей, дающих представление о количестве переходов и методах их выполнения, а также установление вида оборудования и типа производства, в условиях которого будет осуществляться изготовление деталей, являются исходной предпосылкой для разработки и определения содержания операций технологического процесса. Реализация этой части работы технолога представляет собой сложную и многовариантную задачу, требующую, прежде всего, владения технологическими возможностями металлорежущего оборудования.

На основе анализа выбранных маршрутов и методов обработки каждой поверхности, рекомендаций, положенных в основу формирования плана обработки заготовки прежде всего необходимо расчленить изготовление детали на стадии обработки и на этой основе выделить те переходы и методы их реализации (как правило, это чистовые и отделочные), которые по своему технологическому назначению нецелесообразно совмещать с формообразующими методами обработки поверхностей.

Целесообразность разделения технологического процесса на стадии обработки обуславливается необходимостью получения деталей заданной точности и рационального использования оборудования, так как это связано с числом и содержанием операций технологического процесса. На каждой стадии выполняют операции, обеспечивающие примерно одинаковую точность обработки. Таким образом, на первых стадиях совмещают окончательную обработку неточных поверхностей и предварительную обработку точных поверхностей, а окончательную обработку точных поверхностей (тонкую и отделочную) проводят в конце технологического процесса. Такое разделение процесса по стадиям позволяет выделить технологические комплексы поверхностей, которые следует обрабатывать совместно с использованием принципа единства баз, т.е. с одной установки. В такие комплексы обычно включают поверхности, связанные допусками на взаимное положение (относительные повороты, соосность, координатные размеры). Рационально также создавать технологические комплексы по экономическому принципу, добиваясь сокращения оперативного времени за счет последовательной и параллельной концентрации операций.

На первом этапе необходимо выявить те показатели качества, которые и обеспечивают требуемый уровень эксплуатационных свойств. Как правило, эту работу выполняет конструктор при проектировании изделия и выносит их на чертеж детали в виде обозначений (например, шероховатость) или технических требований (например: "Поверхность А цементировать на глубину $h_{0,2...0,3}$ мм, калий до HRC52...56". Или: "Поверхность Б полировать"). А работа технолога состоит уже в том, чтобы грамотно сформировать структуру операции финишной обработки и ее параметры, а именно: выбрать оборудование, инструмент (в том числе и его геометрию), оснастку, определить режим обработки, который с одной стороны обеспечит требуемые показатели качества, а с другой стороны обеспечит минимальную трудоемкость обработки, выберет состав СОТС и др. При этом технолог должен знать с какими характеристиками поверхностного слоя

должна деталь приходить на финишную операцию, иначе в результате финишной операции может получиться совсем не тот результат, который прогнозировался. Технолог должен знать технологические возможности финишных методов обработки и ограничения по их применению.

Требуемый уровень эксплуатационных свойств поверхности детали формируется, как правило, на финишных этапах обработки поверхности детали. Однако, как уже указывалось ранее, необходимо учесть фактор технологического наследования. Поэтому при применении черновых и получистовых методов обработки, формирующих в поверхностном слое материала детали значительные остаточные напряжения или приводящие к структурным изменениям в нем, необходимо перед финишной обработкой рассмотреть вопрос о необходимости проведения термической обработки для подготовки материала поверхностного слоя к формированию тех параметров качества, которые обеспечат требуемый уровень эксплуатационных характеристик поверхностного слоя детали.

Предварительное содержание операций устанавливают объединением тех переходов на данной стадии обработки, которые могут быть выполнены на одном станке. На этом этапе проектирования устанавливают тип, размеры и модели оборудования для выполнения основных операций технологического процесса в зависимости от типа, габаритных размеров детали и заданного масштаба выпуска. При выборе оборудования обычно ориентируются для единичного производства на универсальные станки, для серийного – на универсальные станки, станки с ЧПУ и полуавтоматы, для крупносерийного и массового – на полуавтоматы, автоматы и автоматические линии.

При определении операций изготовления детали необходимо учитывать следующее. Вспомогательные поверхности (мелкие отверстия, фаски, галтели и др.) обычно обрабатывают на чистовой стадии. В самостоятельные операции выделяют обработку зубьев, шлиц, групп отверстий или пазов. Операции механической обработки увязывают с операциями термической и химико-термической обработок. Промежуточная термическая обработка при необходимости применяется после черновой стадии и заключается в нормализации стальных деталей для улучшения их обрабатываемости на чистовых операциях, а также для старения отливок с целью снятия остаточных напряжений в металле заготовки.

Окончательную термическую обработку выполняют в виде объемной или поверхностной закалки. Если окончательная термическая обработка заключается в объемной закалке детали до твердости выше HRC₄₀, то эту операцию выполняют после чистовой обработки до шлифования. При необходимости цементации с последующей закалкой отдельных поверхностей детали применяют защитное омеднение тех поверхностей, которые не подлежат цементации или оставляют на них припуск, который снимают при дополнительной обработке после цементации, но до закалки.

В маршрутный технологический процесс включают второстепенные операции (обработку крепежных отверстий, слесарные операции, промывку и т.п.), а также определяют место контрольных операций. После определения операций изготовления детали необходимо сформулировать наименование и содержание операций. Наименование операции определяется методом обработки и типом оборудования, принятым для его выполнения. Содержание операции записывается в соответствии с ГОСТ 3.1702-79.

5.2 Надежность обеспечения качества поверхностного слоя детали

Надежность обеспечения качества поверхностного слоя включает в себя ряд составляющих, среди которых основными являются надежность технологической операции финишной обработки и предшествующей ей операции, стабильность характеристик качества заготовки. Один из исследователей надежности технологических процессов Дубровский П. В. считает, что в общем случае технологический процесс можно представить в виде многомерного объекта, имеющего специфические особенности. На входе этого объекта действует вектор входных (управляемых) переменных $\vec{x}(\tau)$, при целенаправленном изменении которых обеспечиваются требуемые параметры изделия (рисунок):

$$\vec{x}(\tau) = [x_1(\tau), x_2(\tau), \dots, x_k(\tau)] \quad (1.1)$$

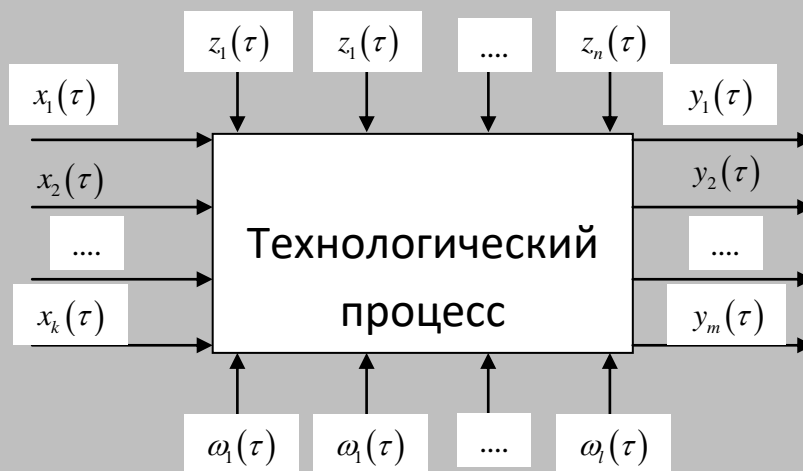


Рисунок 1.7 – Технологический процесс как объект управления

Вектор $\vec{x}(\tau)$ включает как измеряемые, так и неизменяемые входные переменные. Учесть все входные переменные, влияющие на ход процесса, невозможно. В действующем производстве ограничиваются только небольшой частью основных входных переменных, определяющих выходные переменные, а остальные относят к неконтролируемым факторам. Управляемые переменные могут быть изменены системой управления или человеком. Выходные переменные описывает вектор $\vec{y}(\tau)$, составляющие которого характеризуют свойства готовой детали:

$$\vec{y}(\tau) = [y_1(\tau), y_2(\tau), \dots, y_k(\tau)]$$

Составляющими как входного, так и выходного векторов могут быть не только конструктивно-технологические свойства заготовок, деталей и др., но и величины, отражающие технико-экономические показатели процесса.

Неуправляемые (но контролируемые) параметры, характеризующие условия реализации технологии, описывает в общем случае вектор $\vec{z}(\tau)$:

$$\vec{z}(\tau) = [z_1(\tau), z_2(\tau), \dots, z_{n1}(\tau)]$$

Размерность векторов $\vec{x}(\tau)$, $\vec{y}(\tau)$, $\vec{z}(\tau)$ для реальных процессов очень велика и учесть все их составляющие невозможно.

Возмущающие неконтролируемые воздействия на объект управления:

$$\vec{\omega}(\tau) = [\omega_1(\tau), \omega_2(\tau), \dots, \omega_{n1}(\tau)]$$

Процесс функционирования технологического объекта по Дубровскому П.В. может быть описан векторным уравнением:

$$\vec{y}(\tau) = F[x(\tau), z(\tau), \omega(\tau)]$$

Оценка работоспособности технологических объектов предусматривает возможность принятия следующих аналитических технологических решений:

1. Оценка надежности технологических объектов по параметрам качества изготавливаемой продукции, выполняемая на основе методов прикладной статистики.

2. Оценка работоспособности объектов по результатам анализа их математических моделей.

3. Анализ чувствительности объекта, заключающийся в определении влияния изменений входных переменных или условий на изменение выходных переменных.

Процессы промышленного производства имеют вероятностный характер, поэтому измеряемые входные переменные не определяют однозначно выходные параметры процесса. Применяемые технологии серийного и массового типов производства, если они спроектированы правильно, представляют собой достаточно надежные системы.

Значительный разброс составляющих вектора выходных переменных процесса часто обусловлен наличием операций и переходов, выполняемых при управлении непосредственно человеком. С повышением степени автоматизации процесса разброс составляющих вектора выходных переменных снижается, что особенно важно для финишных методов обработки.

5.3 Методы восстановления эксплуатационных свойств поверхностей деталей

Наплавка по сравнению с другими способами восстановления дает возможность получать на поверхности восстанавливаемых деталей (ренодеталей) слой необходимой толщины и нужного химического состава, высокой твердости и износостойкости. Наиболее известные способы наплавки: электродуговая под слоем флюса, дуговая в среде углекислого газа, наплавка с газопламенной защитой, вибродуговая, наплавка порошковой проволокой, электрошлаковая, плазменная наплавка, газопламенная и электроннолучевая.

Электродуговая наплавка под слоем флюса. При такой наплавке в зону горения дуги подают сыпучий флюс, состоящий из отдельных мелких крупиц (зерен). Под воздействием высокой температуры часть флюса плавится, образуя вокруг дуги эластичную оболочку, которая надежно защищает расплавленный металл от действия кислорода и азота. Наплавку под слоем флюса применяют для восстановления многих ренодеталей тракторов, автомобилей и сельскохозяйственных машин. Автоматическая наплавка эффективна в тех случаях, когда нужно наплавить слой толщиной более 3 мм

(например, при выполнении наплавки на ренодеталях ходовой части тракторов и сельскохозяйственных машин — катках, цапфах, роликах, осях и т.д.).

К недостаткам наплавки деталей под слоем флюса относятся большая зона термического влияния, значительный нагрев деталей малых размеров, снижение усталостной прочности деталей на 20—40 %

Для наплавки под слоем флюса применяют устанавливаемые на токарных станках или специальных установках головки типов А-580, ОКС-1031Б, ОКС-1252М и др. Качество наплавленного металла и его износостойкость зависят от марки электродной проволоки, флюса и режима наплавки.

Наплавка порошковой проволокой. Хорошие результаты при наплавке дает использование порошковой проволоки, в состав которой входят феррохром, ферротитан, ферромарганец, графитовый и железный порошки. Наплавку выполняют под слоем флюса или в среде защитного газа, но при введении в проволоку соответствующих компонентов возможна наплавка и без флюсовой или газовой защиты. Исходным материалом порошковой проволоки служит лента из низкоуглеродистой стали и порошок, содержащий необходимые элементы. Используют два типа порошковой проволоки для наплавки под флюсом и для наплавки открытой дугой. Твердость и относительная износостойкость наплавленного металла в зависимости от марок электродной проволоки и флюса.

Этот способ обладает преимуществами перед другими: он позволяет увеличить силу тока, т.е. повысить производительность процесса в 2 раза и более; исключается операция отделения шлаковой корки от ренодетали после наплавки. При этом способе при наплавке, например, на сталь 45 (материал коленчатых валов) обеспечивается трооститомартенситная структура металла, твердость 51,5....57 HRC; износостойкость поверхности получается в 1,6....2 раза выше, чем у стали 45, закаленной токами высокой частоты (ТВЧ).

Для наплавки порошковой проволокой используют токарные станки с головками А-580М, ОКС-1252М, А-765, А-1197, а также специальные станки УД-139, УД-140, УД-143, УД-144, УД-209, УД-233, У-651, У-653, ОКС-11200, ОКС-11236, ОКС-11238, ОКС-14408. Источниками питания дуги являются преобразователи ПСГ-500, выпрямители ВДУ-504, ВДУ-301, ВДУ-1001, ВС-600, ВДМ-1001. Использование порошковой проволоки позволяет снизить расход сварочной проволоки. Наплавку порошковой проволокой и лентой выполняют при постоянном токе обратной полярности. Диаметр электродной проволоки зависит от толщины наплавленного металла с припуском под механическую обработку 0,8...1,5 мм на сторону. Силу тока выбирают в зависимости от скорости наплавки и диаметра проволоки.

Наплавка в среде углекислого газа. Этот способ в значительной степени отличается от других способов восстановления ренодеталей — не нужно ни флюсов, ни электродных покрытий. Дуга между электродом и наплавляемым изделием горит в струе газа, вытесняющего воздух из плавильного пространства и защищающего расплавленный металл от воздействия кислорода и азота. Автоматическая наплавка в среде углекислого газа имеет следующие преимущества: при наплавке отсутствуют вредные выделения и шлаковые корки; открытая дуга дает возможность наблюдать и корректировать процесс, проводить наплавку при любом пространственном положении наплавляемой плоскости, механизировать наплавку, выполняемую на мелких ренодеталях (валах диаметром 10 мм и более). Наплавка деталей в среде углекислого газа имеет следующие преимущества:

высокое качество наплавленных швов, возможность наблюдения за ходом наплавки, возможность наплавки деталей любых диаметров.

К недостаткам наплавки деталей в среде углекислого газа относятся повышение разбрызгивания металла (до 10—12%), органическое изменение состава наплавляемого металла, понижение износостойкости наплавленного слоя, снижение усталостной прочности деталей на 10—50 %.

Для наплавки применяют следующее оборудование: наплавочные головки АБС, А-384, А-409, А-580, ОКС-1252М; источники питания ВС-200, ВСУ-300, ВС-400, ПСГ-350, АЗД-7,5/30; подогреватели газа; осушитель, заполненный силикагелем КСМ крупностью 2,8...7 мм; редукторы-расходомеры ДРЗ-1-5-7, или ротаметры РС-3, РС-3А, РК-65, или кислородный редуктор РК-53Б.

Наплавку в среде углекислого газа выполняют на постоянном токе обратной полярности. Тип и марку электрода выбирают в зависимости от материала восстанавливаемой ренодетали и требуемых физико-механических свойств наплавленного металла. Скорость наплавки устанавливают в зависимости от толщины наплавляемого металла и качества формирования наплавленного слоя. Наплавку валиков осуществляют с шагом 2,5...3,5 мм. Твердость наплавленного металла в зависимости от марки и типа электродной проволоки 200...300 НВ.

Вибродуговая наплавка — разновидность дуговой наплавки металлическим электродом. Технология вибродуговой наплавки предусматривает восстановление деталей с цилиндрическими, коническими наружными и внутренними поверхностями, а также с плоскими поверхностями. Процесс наплавки осуществляется при вибрации электрода с подачей охлаждающей жидкости на наплавленную поверхность.

На суппорте токарного станка закрепляют наплавочную головку (ОКС-6569 или ОКС-1252). Для питания дуги используют источники постоянного тока с жесткой внешней характеристикой (генераторы АНД-500/250, выпрямители ВС-300 и ВС-600, преобразователи ПД-305 и ПСГ-500).

К наплавляемой поверхности ренодетали, которая вращается в центрах токарного станка, роликами подающего механизма из кассеты через вибрирующий мундштук подается электродная проволока. Из-за колебаний мундштука, вызываемых электромеханическим вибратором, проволока периодически прикасается к поверхности ренодетали и расплавляется под действием импульсных электрических разрядов, поступающих от генератора. Под действием вибратора мундштук вместе с проволокой вибрирует с частотой 110 Гц и амплитудой колебания до 4 мм (практически 1,8...2 мм). Вибрация электрода во время наплавки обеспечивает стабильность процесса за счет частых возбуждений дуговых разрядов и способствует подаче электродной проволоки небольшими порциями, что обеспечивает лучшее формирование наплавленных валиков. Благодаря вибрациям процесс наплавки может быть осуществлен при низком напряжении (12...18 В). Охлаждающая жидкость (4...6 %-ный раствор кальцинированной соды в воде) защищает металл от окисления.

Для наплавки внутренних цилиндрических поверхностей головку размещают на станке так, чтобы плоскость мундштука совмещалась с осью ренодетали. Ренодеталь приводят во вращательное движение, головку — в поступательное. Толщина однослойной наплавки в зависимости от режимов колеблется от 0,5 до 3 мм. При многослойной наплавке можно получить слои любой толщины. Подготовка поверхностей для наплавки состоит в очистке их от грязи и ржавчины. Все отверстия и пазы, которые необходимо

сохранить, заполняют медными или графитовыми вставками так, чтобы они выступали над поверхностью на величину, превышающую толщину наплавленного слоя, что позволяет легче удалить их после наплавки.

Вибродуговая наплавка имеет следующие преимущества: небольшой нагрев детали, возможность наплавки деталей с малым диаметром, незначительная зона термического влияния, возможность получения необходимых прочностей наплавленного слоя за счет применения различных марок электродной проволоки.

Вибродуговая наплавка под слоем флюса. Вибродуговая наплавка под слоем флюса имеет ряд преимуществ: дает возможность наплавлять металл только на изношенную часть, что уменьшает трудоемкость последующей механической обработки; получать наплавленный слой без пор и трещин; деформация ренодетали минимальная и не превышает полей допусков посадочных мест; минимальная зона термического влияния. Недостатком вибродуговой наплавки является уменьшение до 40 % сопротивления усталости наплавленных деталей.

Дуговая наплавка с газопламенной защитой. Большими технологическими возможностями при восстановлении деталей широкой номенклатуры в условиях восстановительного производства обладает наплавка с газопламенной защитой.

Способ позволяет наплавлять на ренодетали плотные слои, применяя доступные и относительно дешевые углеродистые проволоки. Металл, наплавленный высокоуглеродистыми проволоками на стальные ренодетали, хорошо воспринимает закалку. Можно также наплавлять стальной низкоуглеродистой проволокой на чугунные ренодетали. Наплавленный слой в этом случае обладает хорошей обрабатываемостью.

Особенностью способа является то, что защитные газы в сварочную зону подаются двумя концентричными потоками: в наружном потоке — природный газ (ГОСТ 5542—78) или пропанбутановую смесь (ГОСТ 20447—80) и во внутреннем потоке — кислород (ГОСТ 5583—78).

Вредное влияние газа на плотность наплавленного металла подавляется кислородом, который подается узким внутренним потоком в зону дуги. По выходе из горелки газ сгорает, образуя пламя. Таким образом, дуга горит в факеле газокислородного пламени. Для защиты от перегрева в процессе наплавки газовая горелка и головка мундштука снабжены рубашками водяного охлаждения, которые включаются последовательно в систему питания водой. Наплавку выполняют на наплавочных станках УД-209, У-653 или на созданной установке на базе токарного станка. Для создания газопламенной защиты установку оснащают горелкой, системой питания горелки газами и системой охлаждения горелки и наплавляемой ренодетали. Для питания дуги применяют источники с пологопадающей или жесткой характеристикой: ВС-600, ВДУ-505, ВДУ-50, ВДУ-601, ПСГ-500 и др.

Электрошлаковая наплавка. Для изготовления биметаллических деталей с износостойким слоем значительной толщины (более 10 мм) применяют электрошлаковую наплавку. В этом процессе используют теплоту, выделяющуюся при прохождении электрического тока через расплавленный шлак. Электрошлаковая наплавка обеспечивает наибольшую производительность по сравнению со всеми другими способами наплавки. С помощью легированных присадок получают наплавленный слой нужного химического состава. Качество наплавленного металла высокое — отсутствуют поры, трещины и другие дефекты.

Наплавку можно выполнять на плоских поверхностях, а также на поверхностях тел вращения. Особенность электрошлаковой наплавки состоит в том, что можно получать гладкие, ровные поверхности наплавленного слоя. Это дает возможность использовать ренодетали без последующей механической обработки. В начале процесса в зазор между ренодеталью и водоохлаждаемой формой заливают расплавленный флюс и возбуждают дугу между электродной проволокой и ренодеталью. После образования шлаковой ванны достаточной глубины дуга потухает, и ток проходит через расплавленный шлак — начинается электрошлаковый процесс. Расход флюса при этом способе в 15..20 раз меньше, чем при электродуговом. Наплавку осуществляют специальными сварочными аппаратами. По мере заполнения зазора наплавленным металлом ренодеталь перемещают относительно аппарата вниз. Восстановленные электрошлаковым методом детали подвергаются соответствующей термической и механической обработке.

Плазменная и микроплазменная наплавка. Плазменная наплавка — это та же сварка плавлением. Здесь действует тоже электрическая дуга. Но это уже сжатая дуга, которую позволяет получить специальная горелка, плазмотрон. Плазмотрон позволяет получить сжатую дугу с температурой до 30000°C . В качестве плазмообразующего газа используют инертные газы (гелий, аргон) если речь идет о сварке изделий. Если же предполагается резка металлов, то основу плазмообразующего газа составляет очищенный от примесей воздух. В зависимости от материала изделия плазменную наплавку проводят на постоянном токе прямой полярности или в импульсном режиме. Для этого плазмотрон соединяют с источником питания 1 постоянного тока или источником питания, обеспечивающим импульсный режим.

Разновидностью плазменной наплавки является микроплазменная наплавка. По конструкции это тот же плазмотрон, но меньших размеров. *Микроплазменная наплавка* позволяет наплавливать различные материалы, сплавы, даже неметаллические изделия (пластмассы, диэлектрические материалы) вплоть до текстильных изделий. Для производства плазменной и микроплазменной наплавки в настоящее время применяются следующие установки: УПС-501, УПС-804 и УПС-301 для плазменной наплавки и установка А-1342 для микроплазменной наплавки

Электронно-лучевая наплавка. Основной компонент — электронный луч, который создается специальным прибором — электронной пушкой. Схема процесса представлена на рис..

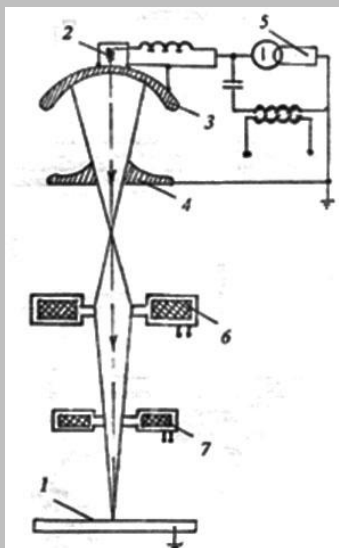


Рис.. Установка электронно-лучевой наплавки: 1 - реноизделие; 2 - катод; 3 - прикатодный электрод; 4 - ускоряющий электрод; 5 - высоковольтный источник постоянного тока; 6 - магнитная линза; 7 - магнитная отклоняющая система

Пушка имеет катод 2 который может нагреваться до высоких температур. Катод размещен внутри прикатодного электрода 3. На некотором расстоянии от катода находится ускоряющий электрод (анод) 4 с отверстием. Электроны, выходящие из катода, фокусируются с помощью электрического поля между прикатодным и ускоряющим электродами в пучок диаметром, равным диаметру отверстия в аноде 4. Положительный потенциал ускоряющего электрода может достигать нескольких десятков тысяч вольт, поэтому электроны, испускаемые катодом, на пути к аноду приобретают значительную скорость и энергию. Питание пушки электрической энергией осуществляется от высоковольтного источника постоянного тока 5.

Для увеличения плотности энергии в луче после выхода электронов из первого анода электроны фокусируются магнитным полем в специальной магнитной линзе 6. Сфокусированные в плотный пучок летящие электроны ударяются с большой скоростью о малую площадку (пятно нагрева) на реноизделии 1, при этом кинетическая энергия электронов вследствие торможения превращается в теплоту, нагревая металл до очень высоких температур.

Для перемещения луча по свариваемому изделию на пути электронов помещают магнитную отклоняющую систему 7, позволяющую устанавливать луч точно по линии наплавки сварки. Сам по себе электронный луч может достигать таких значений, что делает возможным применение его при сварке больших толщин — до 500 мм.

Газопламенное напыление порошковых материалов. Основа процесса газопламенного нанесения — пластификация порошка в высокотемпературном источнике тепла (ацетилено-кислородном пламени) и нанесение его газовыми потоками на предварительно подготовленную изношенную поверхность.

Преимущества газопламенного нанесения состоят в высокой производительности процесса, локальности обработки, незначительном влиянии на подложку, возможности нанесения покрытий на изделия больших размеров, отсутствии ограничений на сочетания материалов покрытия и подложки, что позволяет охватить большую номенклатуру восстановления изношенных ренодеталей.. Рассматриваемый способ позволяет, восстанавливать детали типа вала с износом до 2,5 мм на сторону. Восстановленные детали устойчивы против коррозии, абразивного изнашивания, действия высоких температур.

Технологический процесс газопламенного нанесения, в основном, состоит из трех этапов: нагрева поверхности детали до 200...250 °С; нанесения подслоя, который дает основу, необходимую для наложения основных слоев; нанесения основных слоев, позволяющих получить покрытия с необходимыми физико-механическими свойствами. К основным факторам, влияющим на прочность сцепления покрытия с основой, относятся: способ подготовки поверхности и используемый при этом абразивный материал, параметры струйной обработки поверхности, время выдержки после обработки, наличие предварительного подогрева, применение подслоя и использование термореагирующих порошков, способ распыления, эффективная мощность пламени, параметры процесса распыления, состав материала покрытия (наличие поверхностно-активных добавок в покрытии зависит и от применяемого оборудования и от присадочных материалов).

Газотермическое напыление. При ремонте изделий с помощью газотермического напыления восстанавливают размеры изношенных деталей (шеек валов лесопильных рам, валов деревообрабатывающих станков, шеек осей конвейеров и тележек и т.д.), уменьшают внутренние размеры изношенных посадочных отверстий под подшипники,

втулки и другие детали; наносят на подшипники и втулки антифрикционные покрытия из псевдосплавов, образуемых в результате одновременного распыления двух или трех разных металлов. Этот вид напыления характеризуется своей простотой, технологической доступностью и компактностью. Газотермическое напыление дает стойкие антикоррозионные, жаростойкие, электроизоляционные и износостойкие покрытия. Толщина слоя покрытия от 0,1 мм до 15,0 мм. Оптимально 0,5..3,0 мм. Припуски под последующую обработку минимальны и составляют 10-15% от толщины покрытия. Поверхности могут быть восстановлены неоднократно.

Существуют дуговые и газоплазменные способы нанесения покрытий. Дуговые способы покрытия энергетически выгодны, однако пригодны лишь для распыления металлических стержней. Для порошковых материалов приемлем только газопламенный способ. Перед началом напыления поверхность деталей необходимо очищать механическим, а если потребуется, то и химическим путем.

В данной области используются установки и аппаратура порошкового и проволочного типов. Установка УГПЛ предназначена для ручного напыления термопластовых, цинковых и других материалов с температурой плавления 800°C. В этих установках в качестве напыляемого материала используют порошок. При работе установки используют ацетилен и воздух. Установка УГПТ предназначена для ручного напыления тугоплавких покрытий из хромборникелевых сплавов. Напыляемый материал — порошок. Рабочие газы — ацетилен или кислород. Установка МГИ-4П предназначена для ручного напыления деталей из алюминия, стали, цинка. Напыляемый материал — проволока. Используемые газы — кислород, воздух, бутан, пропан. Установка МГИ-4 имеет те же характеристики, что, и МГИ-4П, но использует только ацетилен, кислород и воздух.

Технологические возможности газотермического напыления:

- газотермическое напыление можно использовать на объектах любых размеров: мосты, суда, трубопроводы, строительные конструкции, котлы, коленчатые валы, лопасти турбин и др.;
- толщина покрытия может составлять от 0,01 до 10 и более мм; они могут иметь заданную пористость (от 0 до 30 и более процентов);
- наносить можно любые материалы, имеющие точку плавления или интервал размягчения;
- в качестве подложки можно использовать дерево, стекло, пластмассы, керамику, композиционные материалы, металлы;
- нанесение покрытий может производиться в широком диапазоне состава покрытия, температуры и давления - в низком вакууме в специальной камере сконтролируемой инертной атмосферой, в воздухе при нормальных условиях, подводой;

Металлизация. Металлизация – один из распространенных способов получения металлических покрытий поверхностей нанесением на эти поверхности расплавленного металла. Сущность процесса состоит в следующем: металл, расплавленный дугой (при электрометаллизации) или ацетиленокислородным пламенем (при газовой металлизации) и распыленный струей сжатого воздуха (давление до 0,6 МПа), покрывает поверхность восстанавливаемой детали. Процесс дуговой металлизации осуществляют специальным аппаратом — металлизатором.

Последовательным наплаиванием расплавленного металла можно получить покрытие, толщина слоя которого может быть от нескольких микрон до 10 мм и более (обычно 1...1,5 мм для тугоплавких и 2,5...3 мм для легкоплавких металлов). Такие покрытия из недефицитных металлов отличаются высокими антифрикционными свойствами, их используют взамен специальных баббитов и бронз. Из-за пористости напыленного слоя металла в него впитывается некоторое количество масла. Это улучшает условия смазывания и обеспечивает длительную работу этих деталей без смазки, но и без заеданий.

В зависимости от источника расплавления металла различают газопламенную, дуговую, высокочастотную и плазменную металлизацию. При ремонте оборудования наибольшее распространение получила дуговая металлизация.

Образовавшаяся окалина на проволоке должна быть удалена пескоструйной обработкой. При нанесении слоя покрытия на поверхность детали ее нагрев до 50...70 °С не вызывает никаких структурных изменений в металле детали, т.е. его механические свойства сохраняются.

С помощью рассматриваемых способов осуществляют заделку трещин в ренодеталях из алюминиевых сплавов, наносят покрытия на любые материалы: металл, пластмассу, дерево, резину и т.п. Металлизация обеспечивает высокую твердость напыленного слоя, что способствует увеличению сроков службы восстанавливаемых деталей. Напыляют самые разнообразные металлы. Например, для напыления может быть использована биметаллическая проволока из алюминия и свинца, что позволяет не только заменять дорогостоящие оловянистые баббиты и бронзы, но и значительно увеличить срок службы подшипников.

При подготовке поверхности ренодеталей к металлизации отдельные операции выполняют в следующей последовательности:

- очищают ренодетали от загрязнений, пленок, окислов, жировых пятен, влаги и продуктов коррозии в моечных машинах, щетками, промывают в бензине или растворителях, нагревают в печах пламенем газовой горелки или паяльной лампы;
- выполняют предварительную обработку резанием поверхности для придания ей правильной геометрической формы и доводят размеры детали до размеров, при которых возможно нанесение покрытий заданной толщины; на концах цилиндрических поверхностей оставляют буртики и протачивают замки в виде кольцевых канавок, предохраняющие покрытие от разрушения;
- получают на поверхностях восстанавливаемых деталей шероховатость, необходимую для удержания нанесенного слоя металла;
- обеспечивают защиту смежных поверхностей деталей, не подлежащих металлизации.

6.1 Совершенствование технологических методов обработки деталей машин.

Под методом обработки понимают комплекс условий, характеризующих взаимодействие обрабатывающей среды или инструмента и обрабатываемой заготовки (детали), используемых для решения одной или совокупности технологических задач: изменения формы, размеров и взаимного расположения элементов детали, состояния и свойств ее материала, поверхности и поверхностного слоя. Метод обработки определяется видом затрачиваемой энергии (механической, химической, электрической, тепловой и т. д.), классом производительности и сущностью процесса формообразования (например, со

съемом металла или пластическим деформированием), типом применяемого инструмента или обрабатывающей среды и их характеристикой (например, металлический лезвийный — резец, фреза, сверло; абразивный круг, брусок, гранулированный абразив, дробь и т. д.), кинематикой процесса и его схемой. Изменение одного из перечисленных факторов вызывает изменение содержания и названия метода обработки. Существует также определение метода обработки как логического множества физических и кинематических параметров — элементов управляемого воздействия на обрабатываемую заготовку (деталь) с решением одной или совокупности технологических задач: изменения формы, размеров и взаимного расположения элементов детали, состояния и свойств ее материала, поверхности и поверхностного слоя.

Метод обработки является основой технологической операции, а их совокупность — основой технологического процесса. Непрерывно возрастающие требования к качеству выпускаемых машин связаны с необходимостью повышения их надежности, которая в значительной степени определяется эксплуатационными свойствами отдельных деталей.

Эксплуатационные свойства деталей машин существенно зависят от качества поверхностного слоя, определяемого геометрическими (макроотклонения, шероховатость) и физико-механическими (микротвердость, структура, остаточные напряжения) параметрами. Все эти параметры зависят от технологии изготовления деталей, однако традиционные методы обработки часто не позволяют эффективно получать необходимые параметры качества поверхностей. Анализ технологических методов обработки поверхностей деталей машин показывает, что универсальных методов нет, каждый имеет свою конкретную область рационального применения, зачастую достаточно узкую. Технолог и конструктор стоят перед проблемой выбора высокоэффективного метода обработки из большого числа возможных или создания на основе их совмещения комбинированного метода обработки детали. На предприятиях машиностроения все шире применяются комбинированные методы термомеханической, электрофизической, электрохимической и ионно-лучевой обработки, в основу которых положено использование высокопроизводительных инструментов, а также разнообразных источников высококонцентрированной энергии. В процессе такой обработки поверхностный слой детали поглощает в короткое время значительное количество энергии. Образующиеся в нем неравновесные диссипативные структуры аккумулируют избыток энергии и самопроизвольно стремятся к состоянию с наименьшей свободной энергией. В поверхностном слое происходят необратимые процессы наследственности и самоорганизации, которые путем наложения и совместных действий потоков энергии ведут к образованию комплекса структур с определенными свойствами.

Большими потенциальными возможностями улучшения эксплуатационных свойств поверхностей деталей машин обладает электромеханическая обработка (ЭМО). ЭМО является особым способом контактной обработки поверхностей высококонцентрированным источником электрической энергии, объединяющим в единой технологической схеме силовое и термическое воздействие инструмента на деталь, что позволяет формировать уникальные свойства поверхностного слоя деталей. Основными особенностями различных видов ЭМО является: наличие нескольких источников теплоты, основные из которых электрический ток и трение, локальный нагрев зоны обработки сопровождается действием значительных давлений, термический цикл обработки кратковременен, достаточно высокая скорость охлаждения, а также влияние других технологических факторов.

В настоящее время разработано большое количество разновидностей электромеханической обработки, представляющие собой комбинацию различных высокоэнергетических воздействий на поверхность обрабатываемой детали, комбинация потоков энергии и вещества в процессе обработки обеспечивает условия, ведущие к стабилизации неравновесных процессов, основой которых является поверхностное пластическое деформирование в условиях трения скольжения при одновременном пропускании электрического тока через зону контакта детали и инструмента. Достаточно полной классификации разновидностей электромеханической обработки, комбинированных методов обработки в основе которых лежит ЭМО не существует, что создает определенные трудности при разработке технологических процессов изготовления деталей с поверхностным упрочнением, в распределении методов обработки по точности формирования поверхности в зависимости от мощности источников воздействия, в создании поверхностных слоев с определенными, наперед заданными или закономерно изменяющимися, параметрами качества поверхностного слоя.

К комбинированным методам обработки также относятся

Вибрационная электрохимическая обработка. Вибрационная электрохимическая обработка характеризуется наложением на рабочее пространство электрохимического процесса.

Вибрационно-центробежная обработка (ВиЦО). В основу создания процесса вибрационно-центробежной обработки положена идея одновременного воздействия направленных вибраций и центробежных сил. При этом возрастает энергетический уровень обрабатывающей среды и интенсивность процесса.

Обработка в псевдокипящем слое с механическим барботированием. Обработка в псевдокипящем слое с механическим барботированием основана на том, что псевдокипящий слой рабочей среды создается различными механическими устройствами.

Импеллерная обработка. Импеллерная обработка состоит в том, что вращающийся в камере импеллер лопастями захватывает и приводит во вращательное движение гранулированную среду, которая под действием центробежных сил отбрасывается к периферии рабочей камеры. В результате этого вся масса загрузки перемещается и приходит в псевдокипящее состояние. Детали, находящиеся в этой загрузке, подвергаются ударному воздействию гранул, в результате которого идет процесс обработки.

Обработка деталей абразивом, уплотненным инерционными силами, представляет собой процесс, в котором съем материала и формирование поверхности происходит в результате контактного взаимодействия обрабатываемой поверхности с уплотненным под действием инерционных сил слоем рабочей среды при их относительном перемещении

Магнитно-абразивная обработка. Магнитно-абразивная обработка осуществляется в гранулированной среде с ферромагнитными свойствами, размещаемой в межполюсном (рабочем) пространстве.

Приведенные примеры далеко не исчерпывают виды комбинированной обработки. В настоящее время постоянно появляются ее новые разновидности и виды. Основной задачей разработки таких методов является обеспечение высоких эксплуатационных свойств поверхностей деталей машин и оптимизация процессов с точки зрения снижения трудоемкости и себестоимости процесса при обеспечении требуемого уровня качества.

6.2 Результаты исследований кафедры «ТМс» в области совершенствования методов обработки

Основные направления научно работы на кафедре "Технология машиностроения" следующие:

- Вибрационная отделочно-упрочняющая обработка.
- Дорнование.
- Комбинированные методы упрочняющей обработки ППД.
- Математическое моделирование технологических процессов.
- Обеспечение надежности технологических процессов.

Наиболее полно и широко рассматривается вибрационная отделочно-упрочняющая обработка.

ВиО в зависимости от характера применяемой рабочей среды представляет собой механический или химико-механический процесс съёма мельчайших частиц металла и его окислов с обрабатываемой поверхности, а также сглаживания микронеровностей путем их пластического деформирования частицами рабочей среды, совершающими в процессе обработки колебательное движение. Процесс сопровождается последовательным нанесением на поверхность обрабатываемых деталей большого числа микроударов частицами рабочей среды при их взаимном соударении и скольжении, вызванных действием направленных вибраций, сообщаемых рабочей камере.

Удары вызваны действием направленных вибраций, сообщаемых рабочей камере инерционным вибратором (рис. 4.36). Рабочая камера получает вибрацию от инерционного вибратора. При этом детали и рабочая среда, непрерывно подвергаясь переменным по знаку ускорениям, совершает два вида движения: колебание и медленное вращение всей массы (циркуляционное движение). От стенок рабочей камеры вибрация передается прилегающим слоям рабочей среды, которые передают ее следующим слоям и т.д.

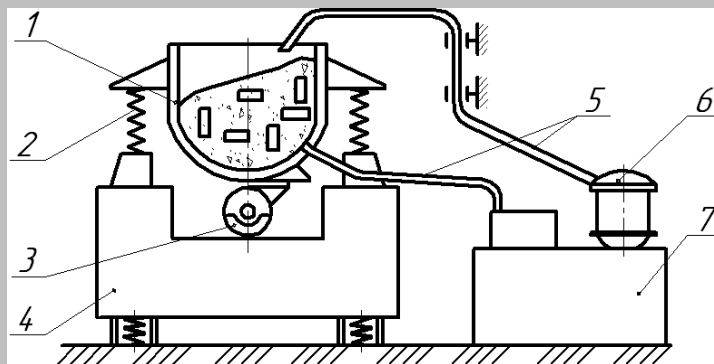


Рис. 4.36. Схема процесса вибрационной обработки: 1 - рабочая камера; 2- пружины; 3 - дебалансный вибратор; 4 - основание; 5 - шланги для подачи и слива СОТС; 6 - помпа; 7 - бак-отстойник.

В качестве рабочих сред при ППД широкое применение в практике виброударной обработки получили стальная и чугунная дробь, литые звездочки, рубленая проволока, стальные полированные шарики и др., при отделочно-зачистной обработке используются абразивные гранулированные среды. В процессе вибрационного упрочнения обеспечивается пластическое деформирование поверхностного слоя, следствием чего является повышение микротвердости, образование сжимающих остаточных напряжений первого рода и уменьшение шероховатости поверхности. При абразивной обработке

происходит снижение шероховатости и формирование полностью стохастического микрорельефа.

Существует несколько технологических схем выполнения ВиО в свободно вибрирующей рабочей среде: обработка всухую или с циркуляцией раствора; обработка свободно загруженных деталей, сравнительно небольших размеров с периодической или непрерывной загрузкой и разгрузкой их; обработка тяжелых и крупногабаритных деталей, закрепленных в специальных приспособлениях; обработка длинномерных деталей типа труб, прутков, профилей и проволоки путем медленного проталкивания их через окна, выполненные в стенках рабочей камеры и др. Реализация этих схем выполнения ВиО осуществляется в вибрационных станках и устройствах различных типов. Но в любом случае они содержат контейнер, заполняемый рабочей средой, вибратор и упругие элементы. Контейнеры для ВиО в зависимости от вида обрабатываемых деталей имеют различную форму: U-образные, торовые и др.

Вибрационная обработка является универсальным методом обработки. Наиболее наглядны его преимущества при обработке деталей сложной формы, а также при обработке деталей небольших размеров разнообразной номенклатуры. Интенсивность обработки зависит от режима и продолжительности обработки, характеристик и размеров частиц рабочей среды, объема рабочей камеры и степени ее заполнения, механических свойств материала обрабатываемых деталей и др.

Дорнование цилиндрических отверстий. Изготовление точных отверстий всегда является более сложной задачей по сравнению с обработкой наружных поверхностей. При обработке резанием это объясняется ограниченным рабочим пространством и в связи с этим недостаточной жесткостью режущего инструмента, затрудненным стружкоотведением, особенно при обработке глубоких отверстий. При шлифовании из-за малых размеров круга трудно достичь оптимальных скоростей резания, на обработанной поверхности часто остаются абразивные крошки, снижающие эксплуатационные свойства деталей.

Применение процесса дорнования отверстий устраняет эти и многие другие недостатки. Поверхностное дорнование – это процесс ППД при поступательном скольжении дорна по внутренней поверхности деформируемой детали. Процесс калибрования отверстий дорнованием заключается в том, что инструмент (дорн) определенной формы проталкивается (протягивается) через обрабатываемое отверстие, имеющее несколько меньшие размеры по сравнению с размером калибрующего дорна (рис. 4.23). При этом вследствие пластических деформаций диаметр отверстия увеличивается, поверхностный слой металла в отверстии упрочняется, а шероховатости сглаживаются.

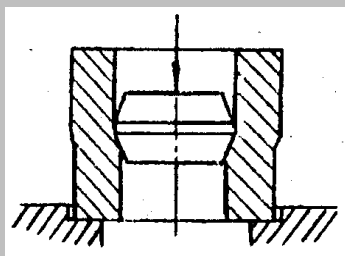


Рис. 4.23. Схема дорнования по схеме сжатия

Рабочая поверхность дорна может быть различной: шаровой, криволинейной, конусной. У каждого дорна можно выделить заборную, калибрующую и обратную части.

Наиболее распространенной формой дорна является коническая. Разность между диаметром дорна d и заготовки d_0 называется натягом дорнования

$$i = d - d_0.$$

Все технологические и качественные характеристики процесса зависят от величины натяга, определяющего степень деформации. В зависимости от величины натяга, деформация детали в поперечном сечении может быть чисто упругой. При дальнейшем росте натяга возникает пластическая зона деформации, охватывающая некоторую область металла детали у отверстия, при дальнейшем увеличении натяга дорнования все поперечное сечение заготовки в зоне деформации находится в пластическом состоянии. Деталь деформируется также и в осевом направлении.

Величина деформации наружной поверхности детали

$$I = D - D_0$$

где D и D_0 – соответственно наружный диаметр детали до и после деформации.

Полная деформация детали, определяемая величиной натяга при дорновании, может быть представлена в виде суммы упругой и пластической деформации:

$$\delta_d = (\delta_d)_{\text{упр}} + (\delta_d)_{\text{ост.}}$$

Однако при рассмотренных схемах дорнования отверстий, особенно в тонкостенных втулках, величина максимальных удельных контактных давлений недостаточна для интенсивного сглаживания неровностей. Это можно устранить, если дорнование осуществлять при ограничении деформации детали по наружному диаметру, помещая деталь в обойму, или при совмещении процесса дорнования с редуцированием (рис. 4.24). В отличие от свободного дорнования при других схемах деформирование идет за счет принудительного утонения стенки детали.

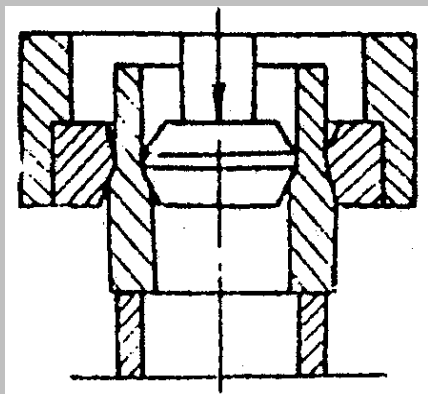


Рис. 4.24. Схема дорнования и редуцирования

Преимущества процессов дорнования в жесткой обойме и совместного дорнования и редуцирования заключается в следующем (рис. 4.24):

- за счет больших контактных давлений шероховатости поверхности интенсивно сглаживаются;
- одновременно с внутренней калибруется и сглаживается наружная поверхность детали;
- процесс приближается к схеме всестороннего сжатия, что позволяет производить обработку с большей степенью деформации без разрушения.

При одной и той же величине натяга тяговое усилие больше при дорновании в обойме и совместном дорновании с редуцированием. Изменяются соотношения между упругими и пластическими деформациями и характер деформации детали в осевом

направлении. В жестких обоймах требуемую шероховатость поверхности можно получить при меньших значениях величины натяга по сравнению со свободным дорнованием.

В производственных условиях процесс дорнования может осуществляться на том же оборудовании, какое применяется и при обработке деталей режущими протяжками, т.е. на разнообразных протяжных станках или прессах. Дорны изготавливают из разнообразных марок сталей, наилучшие результаты по стойкости дают дорны с твердосплавными кольцами (BK8 и T5K10). При дорновании деталей с оптимальным натягом, возможно, получать отверстия с точностью по 8...9-му качеству и шероховатости в пределах $Ra=1,25...0,04$ мкм.

Дорнование (калибрование) фасонных отверстий. Особо ответственные детали со шлицевыми отверстиями изготавливают в большинстве случаев из сталей, подвергающихся цементации и последующей закалке до твердости HRC 56...62. Однако в процессе цементации и последующей закалки происходит деформация (коробление) деталей, которая приводит к искажению формы и размеров шлицевого отверстия на величину, значительно превышающую величину допуска 9-го, а иногда 11-го качества. Обработку (восстановление формы) сопрягаемых поверхностей шлицевого отверстия, имеющих твердость HRC 56...62, при центрировании по наружному диаметру можно производить с помощью шлицевых дорнов.

При калибрующем дорновании фасонным дорном сравнительно тонкий цементированный и закаленный слой металла продавливается дорном и формируется вследствие смещения более вязкого металла, расположенного в глубине детали. Дорнование может применяться не только для калибрования предварительно подготовленных резанием фасонных (шлицевых, многоугольных и др.) отверстий, но и для полного выдавливания дорном разнообразных профилей в предварительно подготовленном цилиндрическом отверстии. При помощи дорнов возможно образование и калибрование сложного профиля не только в цилиндрических, но и в конусных криволинейных отверстиях.

Фасонные дорны изготавливают из тех же инструментальных материалов, что и дорны для цилиндрических отверстий. Наилучшие результаты по стойкости дает инструмент, оснащенный твердосплавными деформирующими элементами. Деформирующие элементы из твердого сплава прикрепляются пайкой или используется механическое крепление на оправке из закаленной стали.