

**ПРИОРИТЕТНЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПРОЕКТ «ОБРАЗОВАНИЕ»
РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ДРУЖБЫ НАРОДОВ**

**Г.Г. ПОЗНЯК
В.В. КОПЫЛОВ
В.А. РОГОВ**

**СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
НАНОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В МАШИНОСТРОЕНИИ**

Учебное пособие

**Москва
2008**

Аннотированное содержание курса.

В истории развития техники и технологии всегда существовала проблема создания изделия с параметрами точности и качества поверхности, превосходящими аналогичные параметры деталей и узлов технологического оборудования, на котором это изделие изготавливалось. Грубо говоря, на «неточном» оборудовании необходимо было изготовить детали, более точные, чем те детали, из которых было собрано это оборудование – только так мог осуществляться технический прогресс. Такие задачи решались для индивидуальных объектов производства с помощью умельцев-самородков, которые чувствовали руками, кожей пальцев ту разницу размеров и шероховатости поверхности, которую называли «микрометрами». На каждом крупном предприятии, как правило, имеется один или несколько таких уникальных рабочих, оберегаемых и поддерживаемых руководством и коллективом.

Однако сейчас, когда развитие техники подошло вплотную к рубежу, который условно называется «нанотехнологиями», требуется иное решение проблемы. Если с помощью прецизионных станков можно было обеспечить точность размеров порядка $\pm(10...1)$ мкм и шероховатость поверхности 0,08...0,032 мкм, то сейчас надо выходить на уровень отклонения размеров $\pm(0,1...0,001)$ мкм и шероховатость поверхности 0,0016...0,00032 мкм.

Надежность работы машин определяется не только геометрическими, но и физико-механическими параметрами поверхностного слоя деталей, так как при эксплуатации детали машин контактируют именно по поверхности – с другими деталями, с рабочим телом (жидкостью или газом) и с окружающей средой. Наблюдающаяся интенсификация этих контактов – увеличение давлений, скоростей, температур и агрессивности жидкостей и газов – требует изменения отношения к поверхностному слою деталей именно в нанометрическом диапазоне. Этот слой должен быть твердым, остаточные напряжения должны быть непременно сжимающими, структура его – чрезвычайно мелкодисперсной, а микронеровностям необходимо придавать сглаженную форму, чтобы обеспечивать большую площадь опорной поверхности, что приводит к снижению местных напряжений.

Важно при этом отметить, что речь идет не об единичных, уникальных изделиях, а об изделиях массового и серийного производства, таких как лопатки современных турбин, головные обтекатели ракет, диски памяти, зеркала для лазеров и т.п.

Таким образом, решение этой задачи имеет две стороны. Во-первых, необходимо обеспечить требуемые свойства поверхности по ее структуре и прочностным свойствам, а во-вторых – добиться необходимой формы и точности размеров на нанометрическом уровне.

Разработанные отечественными учеными методы поверхностного пластического деформирования (ППД) позволяют путем последовательного локального деформирования металла, при котором объем очага деформации имеет размеры порядка десятых долей миллиметра (во всяком случае, не более нескольких миллиметров), осуществлять нормирование размеров очага деформации и тем самым управлять качеством упрочнения поверхностного слоя. Натурные и компьютерные эксперименты позволяют рассчитать долговечность детали, то есть жизненный цикл металла от формирования заготовки до разрушения при эксплуатации, рассматривая его как единый процесс исчерпания ресурса пластичности металла.

Для решения второй задачи – достижения точности формы и размеров изделия – необходимо изучить причины нарушения стабильности относительного положения режущего инструмента и детали и разработать методы повышения стабильности путем активного воздействия узлы, формирующие зону резания.

Раньше, при менее жестких требованиях к точности размеров и к форме обработанной поверхности, этому явлению не уделялось внимания. Важность борьбы с указанным источником нестабильности может быть охарактеризована, например, таким мнением, высказанным в литературе: уменьшение шероховатости плоской поверхности диска памяти на один класс увеличивает объем его памяти на порядок.

При токарной обработке существует три источника нестабильности положения оси шпинделя.

Первый источник – это дисбаланс шпинделя, возникающий при установке на него каждой новой заготовки. Требование нанометрической точности обработанных поверхностей определяет необходимость разработки метода быстрой и точной балансировки с применением новых алгоритмов расчетов и компьютерного управления системой «оператор-компьютер-станок».

Второй источник нестабильности – разбалансировка шпинделя в процессе обработки в рамках одного прохода из-за неравномерности съема металла с обрабатываемой поверхности детали, что приводит к пространственным искажениям обработанной поверхности. Подавление влияния этого источника возможно только на пути автоматической подбалансировки с введением обратной связи.

Третий источник нестабильности – погрешности изготовления и сборки подшипниковых узлов. Хотя подшипники особо точных станков работают в условиях отсутствия металлического контакта, и между поверхностями втулки и шейки ротора всегда имеется газовый слой, отклонение их поверхностей от идеальной формы вызывает при вращении переменные радиальные силы, причем достаточно сложного спектрального состава. Эти силы приводят к нестабильности положения оси шпинделя, сопоставимой с нестабильностью, определяемой указанными ранее источниками. Решение этой задачи требует в разработки теоретических основ и апробации метода компенсации данного источника внутрисистемной нестабильности, а также разработки математических моделей и, в связи с их нелинейностью, анализа их методами компьютерного моделирования.

Таким образом, необходимы новые подходы к решению указанных проблем. Предлагаемый курс ориентирован на подготовку специалистов, которые в результате изучения теоретических вопросов состояния и управления качеством поверхностного слоя и практических технических решений, а также теоретических и практических проблем увеличения стабильности положения оси шпинделя, смогут выполнять необходимую инженерную и научно-исследовательскую работу в указанной области.

Конечно, за такое короткое время (72 часа) подобная задача не решается в полном объеме, однако основу для профессиональной работы в области нанометрических технологий при серьезном отношении студента к этому курсу можно получить.

ЛЕКЦИЯ 1

Общие сведения о состоянии поверхности деталей, обработанных особо точными методами с упрочняющей технологией. Особенности упрочняющих технологий в системе достижения высокой износостойкости и поверхностной прочности

Несущая способность узлов и механизмов, а также общая надежность работы машин непосредственно связана с [качеством поверхностного слоя](#) деталей, которое характеризуется геометрическими и физико-механическими параметрами.

От качества поверхностного слоя зависят эксплуатационные свойства – сопротивление усталости, износостойкость, коррозионная стойкость, сопротивление контактной усталости и др. В связи с интенсификацией эксплуатационных процессов, увеличением скоростей перемещения рабочих органов, повышением температур и давлений роль качества поверхностного слоя значительно возрастает. Связь характеристик качества поверхностного слоя с эксплуатационными свойствами деталей свидетельствует о том, что оптимальная поверхность должна быть достаточно твердой, должна иметь сжимающие [остаточные напряжения](#), мелкодисперсную структуру, сглаженную форму микронеровностей с большой площадью опорной поверхности.

С помощью широко применяемых методов окончательной обработки (шлифование, хонингование, доводка) создается необходимая форма деталей с заданной точностью, но часто не обеспечивается оптимальное качество поверхностного слоя. Оно достигается, например, [поверхностным пластическим деформированием](#) (ППД), при котором стружка не образуется, а происходит тонкое пластическое деформирование поверхностного слоя. Во многих случаях применением ППД удается повысить запасы прочности деталей, работающих при переменных нагрузках, в 1,5-3 раза и увеличить срок службы деталей в десятки раз.

Требуемое качество поверхности достигается на финишных операциях [технологического процесса](#), поэтому окончательная обработка оказывает решающее влияние на эксплуатационные свойства деталей. [Поверхностный слой](#) имеет наибольшее число [дефектов](#), а условия работы деталей и узлов таковы, что наиболее нагруженными являются как раз поверхностные и подповерхностные слои. Такие процессы, как концентрация напряжений, развитие микротрещин, выгорание легирующих элементов, разупрочнение, [изнашивание](#), окисление, перераспределение остаточных напряжений, фреттинг, наиболее интенсивно происходят в поверхностных слоях, что служит основной причиной снижения работоспособности деталей.

При ППД поверхностный слой претерпевает качественные изменения: сглаживаются микронеровности, повышается твердость и прочность, образуются остаточные напряжения сжатия, которые оказывают доминирующее влияние на повышение циклической прочности деталей, сдвигая критические напряжения в область более высоких значений и замедляя процесс развития микротрещин. Кроме того, они снижают чувствительность материала к концентрации напряжений от внешней нагрузки и вблизи конструктивных и технологических концентраторов.

[Качество поверхностного слоя](#) и [износостойкость](#) поверхности определяется:

- высотой неровностей,
- кривизной их вершин,
- параметрами опорной поверхности,
- [микротвердостью](#),
- пределом текучести,
- [коэффициентом трения](#).

Для того чтобы обеспечить работоспособность деталей, конструкционный материал должен иметь высокую конструкционную прочность.

Конструкционной прочностью называется комплекс механических свойств, обеспечивающих надежную и длительную работу материала в условиях эксплуатации. Следовательно, *конструкционная прочность* — комплексная характеристика, включающая сочетание *критериев прочности, надежности и*

долговечности. Прочность — способность материала сопротивляться пластической деформации или разрушению под действием нагрузок.

Критерии прочности материала выбирают в зависимости от условий его работы. Критериями прочности при статических нагрузках являются *временное сопротивление* σ_b или *предел текучести* $\sigma_{0,2}$ (σ_T), характеризующие сопротивление материала пластической деформации. Временное сопротивление σ_b характеризует максимальную несущую способность материала, его прочность, предшествующую разрушению. Характеристики σ_b и $\sigma_{0,2}$ используют также для оценки прочности деталей при кратковременных циклических перегрузках и при малом числе циклов (менее 1000). Поскольку при работе большинства деталей пластическая деформация недопустима, то их несущую способность определяют по пределу текучести.

Большинство деталей испытывают длительные циклические нагрузки. Критерий их прочности — *предел выносливости* σ_R (при симметричном круговом изгибе σ_{-1}).

По величине выбранных критериев прочности рассчитывают допустимые рабочие напряжения. При этом чем больше прочность материала, тем больше допустимые рабочие напряжения и тем самым меньше размеры и масса детали.

Однако повышение прочности материала и, как следствие, рабочих напряжений сопровождается увеличением упругих деформаций. Для ограничения упругой деформации материал должен обладать высоким модулем упругости E (или сдвига), являющимся критерием его *жесткости*.

Жесткость — способность материала сопротивляться упругой деформации. Именно критерии жесткости, а не прочности обуславливают размеры корпусных деталей, от которых требуется сохранение точных размеров и формы.

Для снижения массы и повышения собственных частот деталей важное значение имеет эффективность материала по массе. Она оценивается удельными характеристиками: удельной прочностью $\sigma_b/(\rho g)$, удельной жесткостью $E/(\rho g)$, где ρ — плотность, g — ускорение свободного падения.

Надежность — свойство материала деталей противостоять хрупкому разрушению. Хрупкое разрушение вызывает *внезапный отказ* деталей в условиях эксплуатации. Оно считается наиболее опасным из-за протекания с большой скоростью при напряжениях ниже расчетных, а также возможных аварийных последствий.

Для предупреждения хрупкого разрушения конструкционные материалы должны обладать достаточной пластичностью (δ, ψ) и ударной вязкостью (KCU). *Ударная вязкость* — способность материала сопротивляться разрушению при динамических нагрузках. KCU — основной критерий ударной вязкости, его определяют (ГОСТ 9454-82) как удельную работу разрушения призматического образца с концентратором (надрезом) U-образного вида с радиусом надреза $r_n=1$ мм посередине одним ударом маятникового копра: $KCU=K/S_0$, где K — символ ударной вязкости; U — вид концентратора напряжений; K — работа удара, Дж (кгс·м); S_0 — начальная площадь поперечного сечения образца в месте концентратора, см².

Стремление к уменьшению металлоемкости конструкции ведет к более широкому применению высокопрочных и, как правило, менее пластичных материалов с повышенной склонностью к хрупкому разрушению. В условиях эксплуатации действуют факторы, дополнительно снижающие их пластичность, вязкость и увеличивающие опасность хрупкого разрушения. К таким факторам относятся конструктивные и технологические концентраторы напряжений, низкие температуры, динамические нагрузки, размеры деталей (масштабный фактор).

Для того чтобы избежать внезапных поломок в условиях эксплуатации, необходимо учитывать трещиностойкость материала. *Трещиностойкость* — группа параметров надежности, характеризующих способность материала тормозить развитие трещины. Одним из параметров трещиностойкости является КСТ, определяемый на образцах с трещиной усталости у основания надреза. Он характеризует работу развития трещины при ударном изгибе и оценивает способность материала тормозить начавшееся разрушение. Чем больше параметр КСТ, определяемый при рабочей температуре, тем выше надежность материала в эксплуатации, что особенно важно для деталей газотурбинных двигателей.

Долговечность — свойство материала сопротивляться развитию постепенного разрушения (постепенного отказа), обеспечивая работоспособность деталей в течение заданного времени (ресурса). *Постепенный отказ* — потеря материалом работоспособности, при наступлении которой детали заменяют без угрозы аварийных последствий.

Причины потери работоспособности (постепенного отказа) разнообразны: развитие процессов усталости, изнашивания, ползучести, коррозии, эрозии и пр. Эти процессы вызывают постепенное накопление необратимых повреждений в материале и его разрушение. Обеспечение долговечности

материала деталей означает снижение до требуемых значений скорости его разрушения. Для большинства деталей (более 80%) долговечность определяется сопротивлением материала усталостным разрушениям (циклической долговечностью) или сопротивлением изнашиванию (износостойкостью).

Циклическая долговечность характеризует работоспособность материала в условиях многократно повторяющихся циклов напряжений. Процессы постепенного накопления повреждений в материале под действием циклических нагрузок, приводящие к изменению его свойств, образованию трещин, их развитию и разрушению материала, называют *усталостью*, а свойство противостоять усталости — *выносливостью* (ГОСТ 23207-78).

Разрушение от усталости по сравнению с разрушением от статической нагрузки имеет ряд особенностей.

1. Происходит при напряжениях, меньших, чем при статической нагрузке (меньше предела текучести или временного сопротивления).

2. Начинается на поверхности (или вблизи от нее) локально, в местах концентрации напряжений (деформации).

3. Протекает в несколько стадий, характеризующих процессы накопления повреждений в материале, образование трещин усталости, которые постепенно развиваются и сливаются в одну магистральную трещину, а затем приводят к быстрому окончательному разрушению.

4. Имеет характерное строение излома, отражающее последовательность процессов усталости.

Износостойкость — свойство материала оказывать в определенных условиях трения сопротивление изнашиванию. Изнашивание — процесс постепенного разрушения поверхностного слоя материала путем отделения его частиц под влиянием силы трения. Износостойкость материала оценивается величиной, обратной скорости изнашивания. Обеспечение износостойкости связано с предупреждением катастрофического износа, уменьшением скоростей начального (в период приработки) и нормального (установившегося) изнашивания. Эта задача решается рациональным выбором материалов трущихся пар и способа его обработки. При этом необходимо учитывать, что критерии его износостойкости зависят не только от свойств поверхностного слоя материала, но в сильной мере от условий его работы. Условия работы отличаются таким большим разнообразием, что не найдено универсального износостойкого материала, пригодного для всех условий эксплуатации. Износостойкость материала при заданных условиях трения обычно определяется экспериментальным путем.

Как правило, износостойкость повышается с увеличением твердости поверхностного слоя материала. *Твердость* — способность материала сопротивляться внедрению в него другого, более твердого тела. Между твердостью HB и пределом прочности σ_b для сталей существует эмпирическая зависимость: $\sigma_b = (0,33 \dots 0,36)HB$.

Усталостное изнашивание, сопровождающееся поверхностным выкрашиванием (питтингом), вызывают циклические контактные напряжения сжатия. Они создают в поверхностном слое такое напряженное состояние, которое облегчает пластическое деформирование поверхностного слоя деталей и, как следствие, развитие в нем процессов усталости. Питтинг характерен для материалов, используемых в узлах трения качения в условиях жидкой смазки (зубчатые передачи, шарико- и роликоподшипники). Сопротивление материала поверхностному выкрашиванию называется *контактной выносливостью*.

Повышение контактной выносливости, как и при объемной усталости, основано на увеличении сопротивления поверхностного слоя деталей развитию пластической деформации. В связи с этим высокая контактная выносливость может быть обеспечена лишь при высокой твердости поверхности.

Фреттинг-процесс или *фреттинг-коррозия* наблюдается в кинематически неподвижных сопряжениях (в прессовых, болтовых, заклепочных, а также в местах посадки на вал подшипников качения, зубчатых колес). Повреждения поверхности имеют вид ямок (каверн), которые, как и питтинг, опасны тем, что существенно снижают сопротивление усталости деталей, особенно из титановых сплавов. Предполагают, что разрушение происходит при механическом взаимодействии контактирующих поверхностей (микросхватывании) или адгезионном в сочетании с коррозией. Вырванные окислившиеся частицы металла действуют как абразив вследствие микроперемещений (микродеформаций) контактирующих деталей, особенно в условиях вибраций.

Долговечность деталей, работающих при высоких температурах, определяется скоростью ползучести — скоростью развития пластической деформации при постоянном (ниже предела текучести) напряжении.

Ползучесть — свойство металлов и сплавов медленно и непрерывно пластически деформироваться при высоких температурах под действием рабочих, длительно действующих напряжений, меньших предела текучести.

Пределом ползучести называется напряжение, под действием которого материал деформируется на определенную величину за определенное время при заданной температуре. Предел ползучести характеризует сопротивляемость материала пластическим деформациям в процессе длительного нагружения при высоких температурах.

Ползучесть металлов вызывает [релаксацию напряжений](#) в предварительно нагруженных деталях. При высокотемпературных условиях работы постепенно уменьшаются [напряжения](#) в болтах и других крепежных деталях, ослабляются натяги и т.п. Ограничение скорости ползучести достигается применением жаропрочных материалов.

Жаропрочность — способность материала длительно сопротивляться [пластической деформации](#) и разрушению под действием нагрузок при высоких температурах. Жаропрочность важна при выборе материала, когда рабочие температуры деталей превышают $0,3T_{пл}$.

Пределом длительной прочности называют напряжение, которое вызывает [разрушение](#) материала при заданной температуре за определенное время. Например, $\sigma_{100}^{750} = 300$ МПа означает, что при температуре 750°C материал выдержит действие напряжения 300 МПа в течение 100 часов. Предел длительной [прочности](#) характеризует сопротивляемость материала разрушению в процессе длительного нагружения при высоких температурах. Предел длительной прочности всегда меньше предела прочности, определяемого при кратковременных испытаниях при той же температуре.

Конструкционные материалы при эксплуатации в коррозионной среде должны обладать не только определенными механическими свойствами, но также высокой коррозионной стойкостью. Процессу коррозии наиболее подвержены металлы и сплавы, что объясняется их большой химической активностью и электропроводимостью.

Коррозионная стойкость — способность материала сопротивляться химическому или электрохимическому разрушению при воздействии окружающей среды.

Жаростойкость — способность материала сопротивляться коррозионному воздействию газа при высоких температурах.

Таким образом, в качестве критериев прочности, надежности и [долговечности](#) выбирают те характеристики, которые наиболее полно соответствуют условиям эксплуатации деталей. Конструктор, исходя из заданного ресурса работы детали и условий ее эксплуатации, определяет основные эксплуатационные свойства для наиболее нагруженных поверхностей детали, влияющие на ее работоспособность, и задает в рабочем чертеже детали соответствующие технические требования для достижения конструкционной прочности.

Для выполнения технических требований, указанных в рабочем чертеже детали, технолог выбирает соответствующие методы и [режимы обработки](#) данных поверхностей и осуществляет оптимальное построение [технологического процесса](#).

Нанотехнология - междисциплинарная область фундаментальной и прикладной науки и техники, имеющая дело с совокупностью теоретического обоснования, практических методов исследования, анализа и синтеза, а также методов производства и применения продуктов с заданной атомарной структурой путём контролируемого манипулирования отдельными атомами и молекулами.

ЛЕКЦИЯ 2

Нанотехнологические процессы как одно из основных перспективных направлений современного машиностроения. Основные виды процессов упрочняющей нанотехнологии

Понятие «нанотехнологии» не является однозначным. В последнее время термин «нано» используется очень широко и далеко не всегда к месту и правильно. Определений понятия «нанотехнологии» в литературе достаточно много, от кратких до весьма пространных, что объясняется очень широким диапазоном применения этих самых «нанотехнологий». Не претендуя на исчерпывающую полноту, будем использовать следующие определения, достаточно краткие и отражающие суть понятий:

нанотехнология – совокупность методов и приемов, обеспечивающих возможность контролируемым образом создавать и модифицировать объекты, включающие компоненты с размерами менее 100 нм, имеющие принципиально новые качества и позволяющие осуществлять их интеграцию в полноценно функционирующие системы большего масштаба;

наноматериалы – материалы, содержащие структурные элементы, геометрические размеры которых хотя бы в одном измерении не превышают 100 нм, и обладающие качественно новыми свойствами, функциональными и эксплуатационными характеристиками;

наносистемная техника – полностью или частично созданные на основе наноматериалов и нанотехнологий функционально законченные системы и устройства, характеристики которых кардинальным образом отличаются от показателей систем и устройств аналогичного назначения, созданных по традиционным технологиям.

Нанотехнологии позволяют производить манипуляции с отдельными атомами и молекулами (т.е. регулирование структуры и состава вещества) в масштабах 1-100 нанометров, $1\text{ нм} = 10^{-9}\text{ м}$. Название новой науки возникло в результате добавления к понятию «технология» приставки «нано», означающей изменение масштаба в миллиард раз. Использование характерных особенностей веществ на расстояниях порядка нанометров создает дополнительные, совершенно новые возможности для выработки технологических приемов, связанных с электроникой, **материаловедением**, химией, механикой и многими другими областями науки. Получение новых материалов и развитие новых методик обещает произвести настоящую научно-техническую революцию в информационных технологиях, производстве конструкционных материалов, изготовлении фармацевтических препаратов, конструировании сверхточных устройств.

Нужно отметить, что получение, изучение и использование наноматериалов началось примерно 50 лет назад, поэтому перспективы **нанотехнологий** связаны не с отдельными открытиями, а с комплексным и системным подходом их применения, формированием новой «нанотехнологической формации».

О необходимости создания государственного института развития в области **нанотехнологий** было сказано весной 2007 года в послании Президента Федеральному собранию. Закон «О Российской корпорации **нанотехнологий**» устанавливает особенности правового положения Корпорации, ее цели, порядок осуществления деятельности, права и обязанности Корпорации, ее организационную структуру, а также порядок реорганизации и ликвидации. Официальное краткое название новой корпорации – ГК «Роснано».

Корпорация создается в целях реализации государственной политики в научно-технической и инновационной сфере, содействия перехода экономики Российской Федерации на инновационный путь развития, развития инновационной инфраструктуры, реализации проектов создания перспективных нанотехнологий и наноиндустрии путем осуществления инвестиционной, внешнеэкономической и иной предусмотренной предлагаемым законопроектом деятельности по реализации проектов в области нанотехнологий в России и за рубежом, в том числе с участием иностранного капитала.

Ключевыми направлениями деятельности корпорации являются:

- содействие реализации государственной политики в сфере нанотехнологий;
- развитие инновационной инфраструктуры в сфере нанотехнологий;
- реализация проектов создания перспективных нанотехнологий и наноиндустрии.

Корпорация для достижения целей своей деятельности реализует следующие основные функции:

В области [НИР](#) и [НИОКР](#):

- осуществляет организационную и финансовую поддержку научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок в сфере нанотехнологий.

В области образования в сфере нанотехнологий:

- осуществляет финансирование проектов по подготовке специалистов в сфере нанотехнологий.

В области финансирования инновационных проектов:

- рассматривает проекты в сфере нанотехнологий в целях последующего предоставления финансовой поддержки за счет средств Корпорации;

- осуществляет финансирование проектов в сфере нанотехнологий, предусматривающих внедрение нанотехнологий или производство продукции в сфере наноиндустрии;

- осуществляет мониторинг реализации проектов в сфере нанотехнологий, финансируемых за счет средств Корпорации.

Создание «Российской корпорации нанотехнологий» является важным, но далеко не единственным шагом на пути формирования новой наукоемкой отрасли, развитие которой позволит России занять лидирующие позиции в области нанотехнологий.

Существующие и разрабатываемые нанотехнологии по хронологии их возникновения можно разделить на три группы (по предложению Е.А. Гудилина, ФНМ МГУ):

- к первой группе относятся те [технологии](#), которые известны и применяются уже давно либо требуют доработки для доведения до оптимального состояния. Как правило, такие нанотехнологии работают с хорошо известными дисперсными или ультрадисперсными системами и могут быстро дать экономический эффект;

- ко второй группе относятся наукоемкие нанотехнологии, основанные на генерации новых идей, использовании современного аналитического и синтетического оборудования. Они не могут быть реализованы немедленно, однако способны создать задел для развития новых отраслей производства высокотехнологичных материалов и устройств;

- третью группу составляет нанотехнологический форсайт (foresight, предсказание) – развитие фундаментальных исследований в области нанотехнологий на отдаленную перспективу, поиск новых эффектов и принципов функционирования.

Нанотехнологии не возникли внезапно и на пустом месте. Они являются междисциплинарной областью исследований, основанной на достижениях химии, физики, механики, биологии и других классических наук. В утилитарном плане нанотехнологии – это потенциальное (часто – существенное) улучшение характеристик многих материалов и устройств, имеющих практическое значение.

Важнейшими параметрами наносистем являются размерность, упорядочение и функциональность. Учет всех этих характеристик позволяет создавать нано- и микроструктурированные материалы, которые обладают инновационным потенциалом и способны определить дальнейший прогресс в нанотехнологии. Особенность наноразмерности в том, что здесь реализуются новые и практически важные химические и физические взаимодействия. Любые объекты и материалы нужно изучать в разных пространственных масштабах, на которых особенности структуры и свойств материалов в неразрывной совокупности (структурная иерархия) определяют его конечные свойства.

Обычно при изучении объекта выделяют следующие уровни: *макроуровень* (объект в целом); *микроуровень*, который задает т.н. структурно-чувствительные свойства материала; *субмикронный* уровень; *наноуровень*; *атомарный* уровень, определяющий фундаментальные характеристики вещества.

Таким образом, управляя наноструктурой, можно придавать материалам новые, практически важные свойства, резко отличающиеся от ранее достигнутых.

ВЫБОР ВАРИАНТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

При выборе варианта [технологического процесса](#) у разработчика на современном этапе имеется достаточно много возможностей.

Обычно такие способы обработки, как высокоскоростное фрезерование и электроэрозионная обработка, а в ряде случаев и генеративные технологии, например лазерное спекание или плавление, очень часто дополняют друг друга. Однако развитие технического прогресса все чаще приводит к ситуациям, когда одна технология представляет собой альтернативу для другой. Поэтому особый интерес представляет сравнение между собой возможностей таких [технологий](#), как высокоскоростная обработка (преимущественно [фрезерование](#)), электроэрозионная копировальная прошивка и вырезка, а также прямое лазерное спекание или плавление металла. Сравнение проведем в такой наиболее подходящей для них области, как изготовление сложных инструментов, пресс-форм и штампов.

При сравнении указанных методов сразу же становятся очевидными принципиальные различия между ними. Если высокоскоростная и электроэрозионная виды обработки представляют собой процессы снятия металла тем или иным способом, то лазерное спекание или плавление (DMLS) являются процессами наращивания металла. При этом решающее значение здесь имеют не столько скорость выполнения процесса, например или наращивания, сколько объем снимаемого наращиваемого металла. На [рис. 2.1](#) показано, что при больших удельных съемах металла генеративная технология оказывается более производительной. Для высокоскоростной и электроэрозионной обработки необходимо наличие заготовки, из которой, собственно, и получают готовую деталь, тогда как при технологии DMLS эту деталь послойно выращивают из металлического порошка ([рис. 2.2](#)). Если при копировальной прошивке в качестве формы детали получают зеркальное отображение используемого [инструмента](#), расширяющегося относительно искрового промежутка, то при высокоскоростной обработке, вырезке и технологии DMLS используют геометрически нейтральные инструменты, создающие требуемую конечную геометрию посредством оптической системы или управляемого перемещения по осям координат [станка](#).

Рассмотрим в качестве первого критерия для сравнения выбранных технологических методов свойства обрабатываемых материалов. Именно здесь проявляется основное преимущество электроэрозионной обработки, а именно – независимость от твердости и вязкости обрабатываемого материала, потому что при высокоскоростной обработке [износ](#) инструмента растет вместе с ростом твердости обрабатываемого материала. Если любой материал до твердости 58 HRC можно обрабатывать достаточно легко, то уже начиная с твердости 62-63 HRC наступает предел экономической эффективности высокоскоростной обработки. И все-таки постоянно продолжающиеся исследования [режущих материалов](#) и конструктивные разработки новых инструментов, при которых все усилия сосредоточены на твердой обработке, позволяют постепенно сдвигать вверх границу экономической эффективности [высокоскоростной обработки](#) до более высоких значений твердости заготовок. Генеративные технологии позволяют в настоящее время получать [детали](#) с максимальной твердостью лишь 42 HRC. Поэтому для достижения их более высокой твердости необходима дополнительная физико-химическая или термическая обработка.

Плотность детали при механической и электроэрозионной обработке остается такой же, какой была плотность [заготовки](#). При прямом лазерном спекании металла плотность детали снижается до 92-98 % исходной плотности заготовки, а при плавлении составляет почти 100 %. Такие параметры вполне приемлемы для изготовления пресс-форм.

Другим важным критерием сравнения являются достигаемая точность и получаемое качество поверхности. Здесь высокоскоростная и электроэрозионная обработка имеют явное преимущество. Если при [высокоскоростной обработке](#) (пятикоординатное фрезерование) точность находится в пределах 15-30 мкм, то при электроэрозионной она достигает (погрешность профиля) 10-20 мкм у копировальной прошивки и 4-6 мкм у вырезки. Точность детали, полученной с использованием генеративной технологии, не превышает 0,1 мм. Такие же результаты и по качеству поверхности: в результате высокоскоростной и электроэрозионной обработки получают Ra не хуже 0,2 мкм, а для деталей, изготовленных методом DMLS технологии и не подвергнутых дальнейшей обработке (например, микродробеструйной и полированию), характерно значение Ra = 10 мкм.

Геометрические параметры заготовок при изготовлении пресс-форм и штампов накладывают определенные ограничения на использование той или иной технологии. Например, поддающиеся обработке внутренние радиусы заготовки, которую необходимо подвергнуть высокоскоростному фрезерованию, зависят от диаметра фрезы. Хотя сегодня уже выпускают стандартные фрезы диаметром 0,2 мм, отношение длина/диаметр (l/d), т.е. отношение между длиной вылета фрезы и ее диаметром, ограничивает производительность высокоскоростного [фрезерования](#). С ростом этого отношения надежность фрезерования снижается, поскольку фреза начинает вибрировать. При отношении l/d до 5 можно

рассчитывать на стабильность фрезерования, а при больших его значениях необходимо применение специальных технологий. Указанное отношение отражается также и на глубине обрабатываемых полостей. При обработке глубоких пазов с острыми углами границы эффективности высокоскоростного фрезерования резко сужаются.

При большой глубине полостей рекомендуется их электроэрозионная обработка. Радиусы углов не должны быть больше, чем искровой промежуток между инструментом и заготовкой, а полости могут быть выполнены неограниченно глубокими. При использовании генеративных технологий могут быть получены радиусы углов в пределах точности детали, т.е. примерно 0,1 мм. Глубины полостей так же, как и при электроэрозионной обработке, не являются проблемой, хотя все-таки высота ребра ограничена значениями его ширины (4-10).

Одним из решающих факторов выбора той или иной [технологии](#) является наличие (или отсутствие) возможности в случае ее применения закрепления сложных объемных контуров. Здесь и проявляется своеобразие генеративной технологии, применяя которую, можно изготовить деталь практически любой сложности. Если при пятикоординатном фрезеровании еще существуют ограниченные возможности получения на заготовке без ее переустановки поверхностей с обратным наклоном, то при копировальной прошивке это практически невозможно.

Наряду с получаемым качеством поверхности детали другим решающим фактором выбора технологии является время ее изготовления. При высокоскоростном фрезеровании и электроэрозионной обработке оно определяется объемом снимаемого материала, при DMLS технологии – объемом наплавленного. Разумеется, [фрезерование](#) производительнее как электроэрозионной обработки (его производительность по закаленной стали достигает 3500 м³/мин, т.е. примерно вчетверо выше, чем при копировальной прошивке), так и генеративной технологии (ее максимальная производительность составляет 960 мм³/мин, но сильно колеблется в зависимости от характеристик порошка). Тем не менее, здесь следует руководствоваться темпами удаления или наращивания материала. Если темпы съема (например, степень срезания припуска) высоки, то получают незначительные темпы наращивания (генерируемый объем). Таким образом, если заготовка имеет очень сложный профиль, то может случиться так, что получение детали прямым лазерным спеканием займет меньше времени, чем высокоскоростной обработкой ([рис. 2.1](#)). Как показано в [табл. 2.1](#), каждая из трех технологий имеет свою область применения и сегодня не может быть заменена другой. На первый взгляд, в связи с необходимостью использования электродов определенного профиля копировальная прошивка является негибким методом обработки. Однако если твердость заготовки исключительно высока или в ней имеются очень глубокие полости, то прошивка будет единственным способом, которым эту заготовку можно обработать. [Высокоскоростная обработка](#) достигла сегодня больших успехов и вследствие большого разнообразия применяемых [инструментов](#) обладает большой гибкостью относительно геометрических параметров заготовок и их материала. Кроме того, такая высокая скорость обработки не может быть достигнута другими способами. Однако чем сложнее заготовка, тем больше трудностей возникает при ее высокоскоростной обработке. Конечно, по точности, качеству получаемой поверхности и твердости получаемого в результате материала металлических [деталей](#) генеративные [технологии](#) уступают пока остальным. Но уже сейчас существует немало деталей, которые невозможно получить классическими способами, поэтому приходится использовать генеративные технологии, и они обладают достаточной экономической эффективностью.

Табл. 2.1. Сравнительные характеристики технологий изготовления деталей

Параметры	Электроэрозионная обработка		Высокоскоростная обработка	Прямое наращивание	
	Копировальная прошивка	Проволочная вырезка		Лазерное спекание	Лазерное плавление
Твердость	Не ограничена		58-62 HRC	Не более 42 HRC	
Плотность, %	100		100	92 – 98	До 100
Достижимая точность (погрешность профиля), мкм	10–20	4–6	10–20 (15–30 при пятикоординатной обработке)	Свыше ±50	±50
Достижимое качество поверхности, Ra, мкм	0,2	0,05	0,1	10	Не определено
Радиусы скруглений углов (внутренние)	Искровой промежуток (при черновой обработке выше, чем при чистовой)	Радиус проволоки (0,015 мм) + искровой промежуток	Радиус фрезы, зависит также от отношения l/d	Определяется точностью детали	
Соотношение критических параметров (отношение глубины паза / высоты ребра к его ширине)	Практически не ограничено	Не ограничено (2Ø)	При большом отношении l/d (< 5) мм) снижается надежность процесса	~ 4 (ширина < 1 мм) ~ 10 (b> 3)	
Толщина стенки	Значительно меньше 1 мм		Определяется стратегией обработки	0,7 мм	
Подрезы	Невозможны	Ограниченно возможны		Возможны	

Скорость съема или наращивания материала	900 мм ³ /мин при черновой обработке 0,05 мм ³ /мин при чистовой обработке	180 мм ³ /мин 100 мм ² /мин Ra=0,2мкм	3500 мм ³ /мин при черновой обработке 150 мм ² /мин Ra=0,2 мкм	Макс. 960 мм ³ /мин (в зависимости от порошка явно меньше)	120 мм ³ /мин (все еще в стадии разработки)
--	---	---	--	---	--

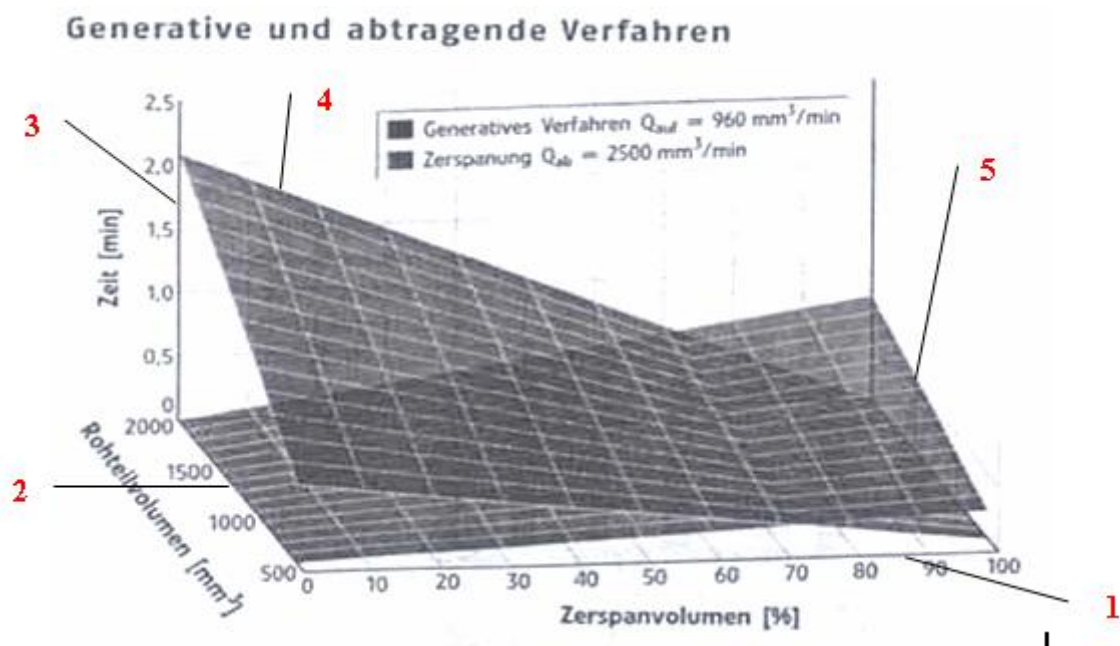


Рис. 2.1. Сравнительная номограмма технологий снятия и наращивания металла:

1 – производительность резания, %; 2 – объем заготовки, мм³; 3 – время, мин; 4 – генеративная технология $Q_{auf} = 960$ мм³/мин; 5 – резание $Q_{an} = 2500$ мм³/мин



Рис. 2.2. Пример детали, полученной с помощью генеративной технологии.

Полая структура, полученная методом лазерного спекания

ЛЕКЦИЯ 3

Физические основы деформационного упрочнения металлов. Сущность, особенности и состояние поверхностного слоя детали. Параметры состояния поверхностного слоя деталей машин

Поверхностный слой детали – это слой, у которого структура, фазовый и химический состав отличаются от основного металла, из которого сделана деталь.

В поверхностном слое (рис. 3.1) можно выделить следующие основные зоны:

- зону 1 (толщина 1-100 нм) адсорбированных из окружающей среды молекул и атомов органических и неорганических веществ;
- зону 2 (толщина 1-10 мкм) продуктов химического взаимодействия металла с окружающей средой (обычно оксидов);
- граничную зону 3 толщиной несколько межатомных расстояний, имеющую иную, чем в объеме, кристаллическую и электронную структуру;
- зону 4 с измененной по сравнению с основным металлом структурой, фазовым и химическим составом, который возникает при изготовлении детали и изменяется в процессе эксплуатации.

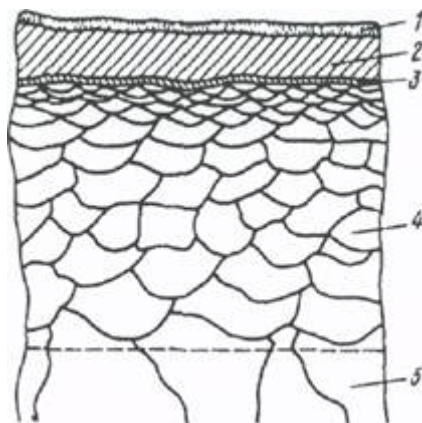


Рис. 3.1. Схема поверхностного слоя детали

Толщина и состояние указанных слоев поверхностного слоя могут изменяться в зависимости от состава материала, метода обработки, условий эксплуатации. Оценка этого состояния осуществляется методами химического, физического или механического анализа. Многообразие параметров состояния поверхностного слоя и методов их оценки не позволяет выделить единственный параметр, определяющий качество поверхностного слоя. Поэтому в научной и инженерной практике состояние поверхностного слоя оценивается набором единичных или комплексных параметров, с той или иной стороны оценивающих качество поверхностного слоя.

Укрупнено эти параметры характеризуют:

- геометрические параметры неровностей поверхности;
- физическое состояние;
- химический состав;
- механическое состояние.

Рассмотрим основные параметры состояния поверхностного слоя.

Геометрические параметры неровностей поверхности оцениваются параметрами шероховатости, регулярных микрорельефов, волнистости.

Шероховатость поверхности – это совокупность неровностей с относительно малыми шагами, выделенных, например, с помощью базовой длины. Примерное отношение высоты неровностей к шагу менее 50.

Шероховатость поверхности характеризуется рядом стандартизованных по ГОСТ 2789-73 параметров: $R_{\text{таx}}$, R_z , R_a , S_{mr} , S , t_p . При необходимости используют также и нестандартизованные параметры, например радиус единичного выступа или впадины неровностей.

В отдельных случаях для нормирования шероховатости применяют направление неровностей, форму, относительную опорную кривую профиля и другие, которые оказывают существенное влияние на долговечность деталей.

Поверхность, обработанная ППД, имеет сглаженный профиль шероховатости, высокую опорную способность, увеличенный радиусы выступа и впадин, пониженный коэффициент концентрации напряжений во впадине, хорошую маслосъемкость поверхности (рис. 3.2).

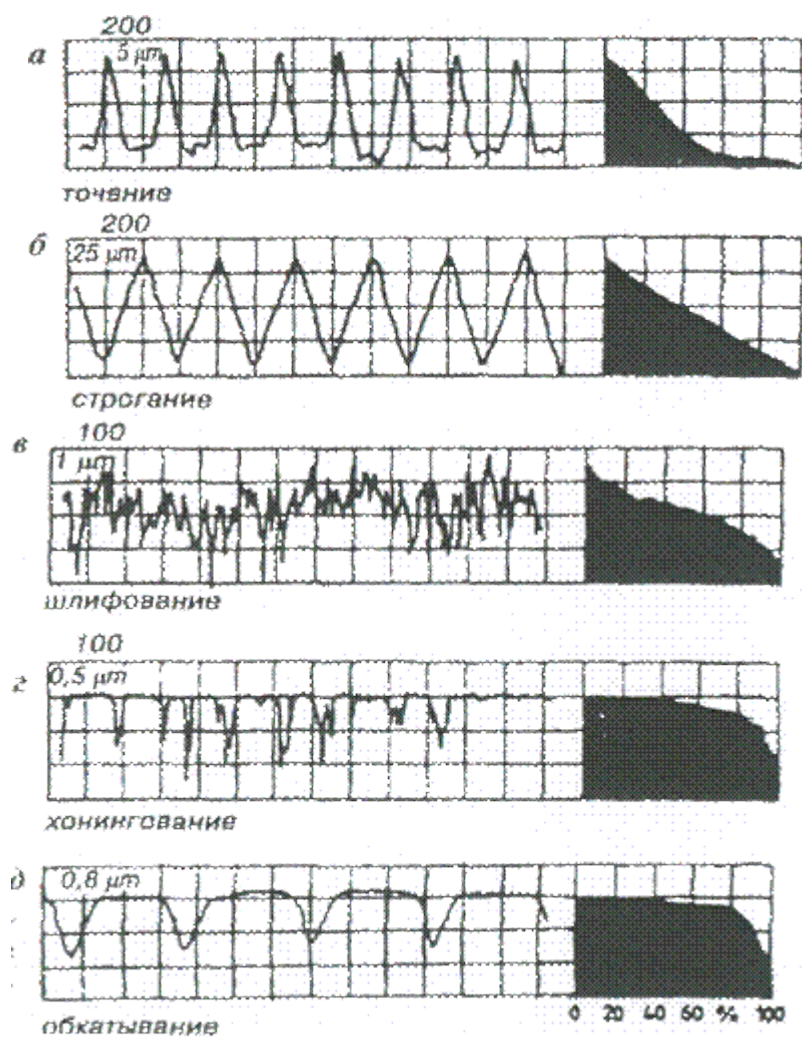


Рис. 3.2. Профилограммы шероховатости и опорные кривые поверхностей, обработанных различными методами

Волнистость поверхности – это совокупность неровностей, имеющих шаг, больший, чем базовая длина, используемая для измерения шероховатости (отношение высоты к шагу более 50 и менее 1000).

Так как в России волнистость не стандартизована, то для ее оценки используют параметры, аналогичные параметрам шероховатости, или параметры, установленные отраслевыми нормами или зарубежными стандартами. При обработке ППД волнистость может возникнуть как результат [вибрации](#), погрешности изготовления инструмента, увеличенной [подачи](#) и других факторов.

Регулярные микрорельефы (РМР) – это неровности, которые, в отличие от шероховатости, одинаковы по форме, размерам и взаиморасположению.

В соответствии с ГОСТ 24773-81, поверхности бывают с полностью или частично регулярным микрорельефом.

Для нанесения РМР используют механическую обработку резанием или ППД единичным инструментом с заранее заданной кинематикой движения или накатывание фасонными роликами или травление.

Наибольшее распространение в промышленности получило нанесение РМР методом ППД – вибронакатыванием шариком. Использование РМР оказывается весьма результативным для повышения эксплуатационных свойств деталей.

Физическое состояние [поверхностного слоя](#) деталей в технологии упрочнения ППД наиболее часто характеризуют параметрами [структуры](#) и фазового состава.

Структура – это характеристика [металла](#), зависящая от методов изучения его строения. Выделяют следующие типы структур:

- кристаллическая структура;
- субструктура;
- микроструктура;
- макроструктура.

Металлическое твердое тело представляет собой совокупность множества произвольно расположенных и взаимосвязанных [кристаллов](#). Атомы, определенным образом расположенные в кристалле, образуют его кристаллическую структуру (решетку). В реальном металле кристаллическая структура имеет множество [дефектов](#), которые в значительной степени определяют его свойства. Совокупность дефектов решетки и пространственное их распределение в кристалле называется субструктурой.

Кристаллы неправильной формы образуют более крупные агрегаты – кристаллиты, блоки, зерна, фрагменты, внутри которых кристаллографические плоскости повернуты относительно друг друга на угол разориентировки.

Микроструктура – это структура, определяемая с помощью металлографических микроскопов. Этот анализ позволяет определить наличие, количество и форму структурных составляющих [сплава](#).

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

Каждое вещество может существовать в различных формах, которые называются фазами. Простейшими фазами являются, например, жидкое и твердое состояние. Однако переход из жидкого состояния в твердое может осуществляться при различных давлениях и температурах. При этом будут меняться кристаллографическая структура и свойства материала. Способность вещества существовать в нескольких состояниях называется полиморфизмом, а его различные полиморфные состояния принято обозначать греческими буквами α , β , γ и т.д.

Фазовый состав характеризуют числом и концентрацией фаз, распределением фаз по поверхностному слою, типом кристаллической структуры фаз, объемом сплава и др. Исследование физического состояния осуществляется экспериментальными методами физики твердого тела.

Химический состав характеризуется элементным составом сплава и фаз, концентрацией элементов в объеме фаз, в объеме сплава и др. Исследования химического состава [поверхностного слоя](#) позволяют оценить адсорбцию из окружающей среды молекул и атомов органических и неорганических веществ, диффузионные процессы, процессы окисления и другие, происходящие при обработке [металлов](#).

Методы исследования физического и химического состояния поверхностного слоя позволяют дать объяснения явлениям, происходящим в поверхностном слое при обработке, и установить их связь со свойствами металла.

Однако параметры физико-химического анализа довольно сложно определяются, связать их с [технологией](#) можно только на эмпирическом уровне.

Для решения технологических задач в большинстве случаев достаточно знания о средних показателях состояния довольно большой группы атомов материала. Это позволяет перейти от микроскопического уровня анализа материала к макроуровню. В этом случае [металл](#) рассматривается не как дискретная, а как сплошная среда. Ее поведение описывается уравнениями механики сплошных сред, которые устанавливают связь кинематических характеристик (деформированного состояния) с силовыми (напряженное состояние). Эта связь устанавливается на основе принятия специальных гипотез и постановки соответствующих экспериментов.

Механическое состояние металла определяется параметрами:

– сопротивления деформированию: предел упругости, предел пропорциональности, [предел текучести](#), [предел прочности](#), [твёрдость](#) и др.;

– [пластичности](#): относительное удлинение, относительное сужение, ударная вязкость и другие, устанавливаемые специальными испытаниями образцов.

В процессе [пластической деформации](#), которая всегда сопровождает [механическую обработку](#), все характеристики механического состояния поверхностного слоя изменяются: показатели сопротивления деформированию увеличиваются, а показатели пластичности уменьшаются. Это явление называется **деформационным упрочнением** (наклепом).

В [табл. 3.1](#) показано изменение механических свойств малоуглеродистой стали (0,06% С) в результате пластической деформации.

В инженерной практике деформационное упрочнение поверхностного слоя в большинстве случаев определяют измерением твёрдости или [микротвёрдости](#). [Твёрдость](#) (микротвёрдость) характеризует сопротивление [металла](#) пластическим деформациям и обнаруживает хорошую корреляцию со стандартными механическими характеристиками металла.

С использованием методов косого среза или послойного травления поверхностного слоя определяют распределение в нем микротвёрдости H , а результаты измерения представляют в виде графика ([рис. 3.3](#)), по которому устанавливают толщину упрочненного слоя h_n и степень деформационного упрочнения δ_n (индекс «н» означает, что степень упрочнения определяется измерением твёрдости), вычисляемую по формуле

$$\delta_n = (H_{обр} - H_{исх}) / H_{исх},$$

где $H_{обр}$ и $H_{исх}$ – соответственно [твёрдость](#) (микротвёрдость) [металла](#) после и до обработки.

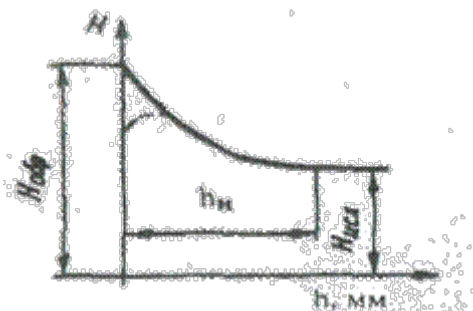


Рис. 3.3. Эпюра распределения твердости в поверхностном слое после ППД

При возникновении достаточно сильного теплового потока в ОД, наряду с [упрочнением](#) металла в результате пластического течения, может произойти его [разупрочнение](#). В этом случае микротвёрдость отдельных слоев поверхностного слоя уменьшается (см. пунктирную кривую на [рис. 3.3](#)).

Спад эпюры твердости возможен также из-за торможения пластического течения в при контактной зоне ОД, из-за «шелушения» металла или в результате погрешности измерения микротвёрдости на краю шлифа.

Степень деформационного упрочнения зависит не только от режимов ППД, но и от способности материала к упрочнению ([рис. 3.4](#)).

Важной характеристикой состояния поверхностного слоя являются [остаточные напряжения](#).

Остаточные напряжения (ОН) – это упругие напряжения, которые остались в детали после обработки.

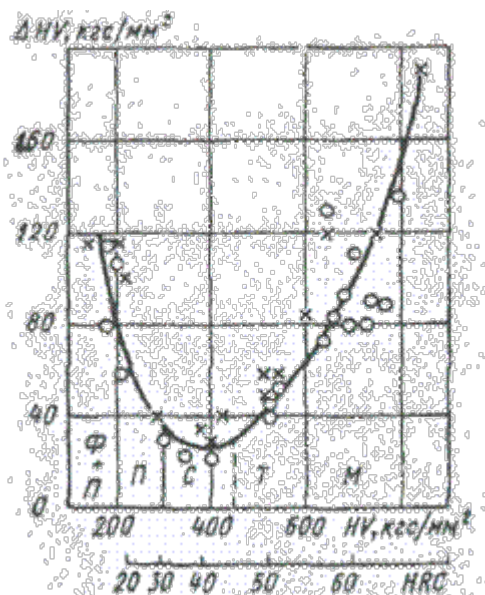


Рис. 3.4. График прироста твердости ΔHV в зависимости от структурного состояния сталей [1.28]:

Φ – феррит, P – перлит, C – сорбит, T – троостит, M – мартенсит, o – легированные стали, x – углеродистые стали

Табл. 3.1. Влияние наклепа на механические свойства малоуглеродистой стали (0,06% C)

Удлинение при растяжении, %	Предел пропорциональности, кгс/мм ²	Предел текучести, кгс/мм ²	Предел прочности, кгс/мм ²	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	Ударная вязкость, кгс/мм ²	Твердость, HB
0	21,5	23,3	35,5	40,5	75,0	18,0	105
10	39,7	41,3	44,0	21,0	71,8	16,9	145
20	42,1	46	47,0	16,9	68,1	9,6	156
30	46,5	50,2	51,3	10,3	62,1	10,5	164

В зависимости от объемов тела, в которых рассчитывают остаточные напряжения, они условно подразделяются на ОН:

- первого рода, уравновешенные в макрообъемах тела;
- второго рода, уравновешенные в пределах размера зерен;
- третьего рода, уравновешенные в пределах нескольких межатомных расстояний.

Источником возникновения [ОН](#) являются микронапряжения, возникшие в кристаллической структуре в результате пластического течения [металла](#), нагрева и [фазовых превращений](#). Сумма проекций сил, возникших в кристаллической структуре металла, образует объемные силы – остаточные напряжения 1-го рода, которые могут рассматриваться в качестве одного из параметров механического состояния [поверхностного слоя](#).

В зависимости от характера и интенсивности физико-механических процессов, происходящих при обработке, ОН могут иметь различный знак. В связи с этим различают сжимающие (-) и растягивающие (+) ОН. Остаточные напряжения – это тензор. Поэтому они могут быть спроектированы на любые оси заданной системы координат.

Условия равновесия требует, чтобы в объеме тела сумма проекций всех сил была равна нулю. Поэтому в детали всегда есть области со сжимающими и растягивающими ОН. Однако при исследовании ОН ограничиваются построением эпюр ОН только в поверхностном слое.

В инженерной практике ОН 1-го рода принято представлять в виде проекции на оси заданной системы координат. Например, для тела вращения используют понятия осевых σ_x^o окружных (тангенциальных) σ_θ и радиальных σ_r остаточных напряжений.

Обобщенно можно сказать, что остаточные напряжения 1-го рода возникают или как результат неравномерных [пластических деформаций](#) и последующей разгрузки или неравномерного нагрева и охлаждения различных слоев детали, или как результат того и другого. Остаточные напряжения 1-го рода определяются экспериментальными методами, среди которых наибольшее применение нашли методы послойного травления и рентгеноструктурного анализа. По результатам эксперимента строят эпюру (или

эпюры) ОН в различных сечениях тела, например в осевом и тангенциальном сечениях вала. Определяют по ним глубину h_o° залегания ОН (рис. 3.5), величину ОН на поверхности σ_n° , подслонный максимум сжимающих остаточных напряжений σ_{max}° и другие характерные точки эпюры. Особенности механических, тепловых и структурно-фазовых процессов, происходящих при ППД, могут привести к появлению подслонного минимума сжимающих напряжений σ_{min}° (см. штриховую кривую 1 на рис. 3.5) или к отсутствию подслонных экстремумов (см. кривую 2).

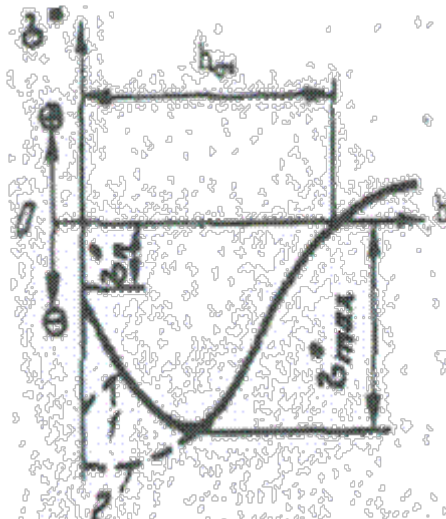


Рис. 3.5. Пример эпюр остаточных напряжений

Следует отметить, что $h_n \neq h_o^\circ$. Кроме того, экспериментальное значение h_n зависит от метода измерения и его точности. Например, малое изменение твердости (см. рис. 3.3) на участке, примыкающем к точке $h=h_n$, в сочетании с достаточно большой погрешностью метода твердости может привести к значительной погрешности определения h_n .

Сложное взаимодействие механических и тепловых процессов, происходящих в ОД при ППД, может привести к возникновению в поверхностном слое различных по характеру эпюр ОН.

Следует отметить, что существующие точки зрения на причину спада ОН к поверхности являются по своей сути гипотезами, так как они были выдвинуты без количественного анализа напряженно-деформированного состояния очага деформации и температурных полей, возникающих в нем.

Ни одна из гипотез формирования ОН не объясняет, почему величина осевых остаточных напряжений в 1,5-2 раза выше тангенциальных. Почему осевые ОН не имеют спада к поверхности или имеют, но значительно меньший, чем тангенциальные ОН? Почему при обкатывании с малой силой спад ОН отсутствует или он существенно меньше, чем при обработке с большой силой?

Рассмотренные параметры состояния поверхностного слоя являются основными, которые определились в инженерной науке о поверхностном слое. Их широкое применение объясняется наличием инструментальных методов их измерения. С развитием науки методы оценки состояния поверхностного слоя могут дополняться, а следовательно, могут изменяться и параметры, характеризующие состояние поверхностного слоя.

ЛЕКЦИЯ 4

Физические основы разрушения металлов. Понятие дислокации.

Классификация узлов трения. Виды изнашивания

Металлы, как твердые вещества, сохраняют свою форму благодаря кристаллической структуре. Геометрическим образом кристаллической структуры является трехмерная решетка, в пространстве которой располагаются атомы. В зависимости от характера расположения атомов в кристаллической решетке структуры чистых металлов разделяются на ряд типов. На рис. 4.1 представлены элементарные ячейки наиболее распространенных типов решеток, где атомы изображены черными кружками. Типы решеток для некоторых металлов представлены в табл. 4.1.

Табл. 4.1. Кристаллические решетки некоторых металлов

Решетка	Металлы
Объемно центрированная кубическая	Gr, α -Fe, Mo, W, Nb, V, β -Ti
Гранецентрированная кубическая	Al, γ -Fe, β -Co, Ni, Cu, Ag
Гексагонально- плотноупакованная	Mg, Zn, α -Ti, Hf, α -Co

Стабильность кристаллической решетки обеспечивается определенным соотношением между силами отталкивания и притяжения между атомами.

Энергию взаимодействия двух атомов кристаллической решетки можно представить в виде:

$$U = (-A/r^m) + (B/r^n), \quad (4.1)$$

где A и B – константы; m и n – показатели степени для сил притяжения и сил отталкивания (n всегда больше m); r – расстояние между атомами.

Минимум потенциальной энергии пары атомов, т.е. $U=U_0$, достигается при $r=r_0$, когда $dU/dr=0$ и $Am/r_0^{m+1}=Bn/r_0^{n+1}$.

С учетом этого уравнение (4.1) преобразуется в уравнение сил связи:

$$\frac{dU}{dr} = P = \frac{Am}{r_0^{m+1}} \left[\left(\frac{r_0}{r} \right)^{m+1} - \left(\frac{r_0}{r} \right)^{n+1} \right], \quad (4.2)$$

где P – равнодействующая межатомных сил.

Приложение внешнего напряжения к кристаллической решетке приводит к изменению расстояния между атомами $r=r_0 + \Delta r$ и, в соответствии с уравнением (4.1) и (4.2), к изменению потенциальной энергии и силы P .

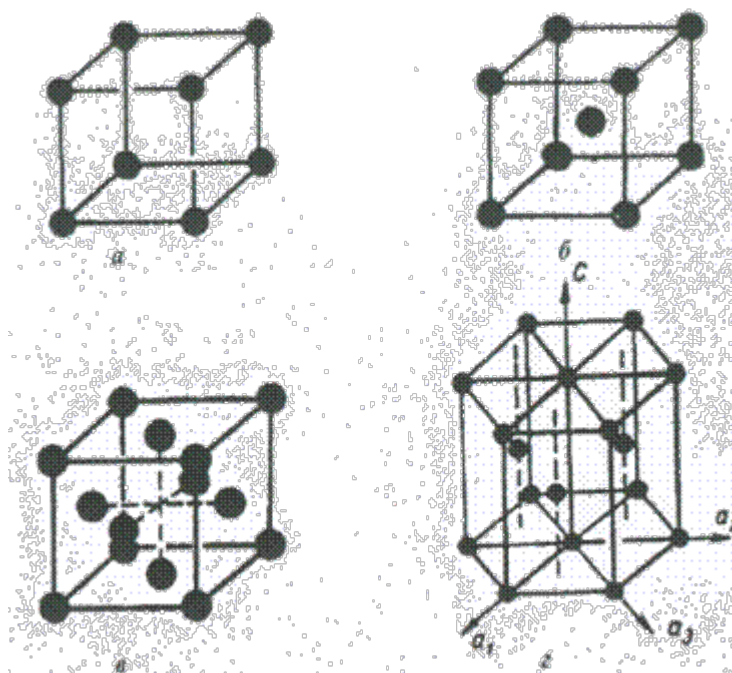


Рис. 4.1. Типы кристаллической структуры:

a – простая кубическая; *b* – объемно центрированная кубическая; *c* – гранецентрированная кубическая; *d* – гексагонально-плотноупакованная.

Расчеты с использованием формулы (4.2) показывают, что [напряжение](#), которое необходимо приложить к идеальному кристаллу для осуществления [деформации](#) $\Delta r/r_0$, значительно (на два-три порядка) превышает напряжения, которые экспериментально можно наблюдать в реальных материалах.

В соответствии с современными взглядами на строение металла существенное различие теоретической и физической прочности объясняется наличием структурных несовершенств (дефектов) кристаллов. [Структурные дефекты](#) оказывают существенное влияние на упрочнение и разрушение металла при [пластической деформации](#), поэтому без понимания механизма влияния этих дефектов на прочность металла нельзя понять физическую сущность [деформационного упрочнения](#).

СТРУКТУРНЫЕ НЕСОВЕРШЕНСТВА В РЕАЛЬНЫХ КРИСТАЛЛАХ

Структурные несовершенства в кристаллах возникают в результате кристаллизации металла, [термической обработки](#), [пластической деформации](#) и др. Структурные несовершенства (дефекты) кристалла по геометрическому признаку подразделяются на четыре группы: точечные, линейные, поверхностные (или плоские) и объемные.

Точечные дефекты по своим размерам сопоставимы с размерами атома. В чистых кристаллах возможны два типа точечных дефектов – [вакансии](#) и [межузельные атомы](#) (см. рис. 4.2, *a*). Вакансии образуются при удалении атома из узла решетки, а межузельный атом – при введении атома в межузельное пространство.

Образование вакансий и межузельных атомов связано с тем, что колеблющиеся около положения равновесия атомы могут под влиянием привнесенной извне энергии выходить из положения равновесия, образуя после себя в узле кристаллической решетки пустоту (вакансию) и, соответственно, межузельный атом.

Количество вакансий и межузельных атомов может быть увеличено резким охлаждением металла, [пластической деформацией](#), облучением высокоэнергетическими лучами.

Например, количество точечных дефектов в кристаллах при пластической деформации можно определить по зависимости

$$n/N = (10^{-5} + 10^{-6}) \varepsilon,$$

где n – предельное число равновесных точечных дефектов; N – общее число атомов; ε – деформация в %.

В качестве точечных дефектов чистых металлов можно также рассматривать примесные атомы замещения и внедрения (см. рис. 4.2, б). Все точечные дефекты образуют локальные искажения кристаллической решетки, повышая тем самым энергию, зависящую от размера введенных атомов и расстояния между ними.

Линейные дефекты кристаллической решетки имеют размеры, близкие к атомным, в двух измерениях, и значительную протяженность в третьем. К этому виду дефектов относятся дислокации, простейшими из которых являются краевые и винтовые.

На рис. 4.3 представлена модель краевой дислокации на примере простого кубического кристалла. Она образуется путем внедрения в кристалл лишней плоскости атомов $ABCD$, называемой экстраплоскостью. Граница экстраплоскости – линия CD – является краевой дислокацией. Экстраплоскость действует как клин, создавая сильное искажение кристаллической решетки, особенно в окрестности атомов, расположенных на линии дислокации CD .

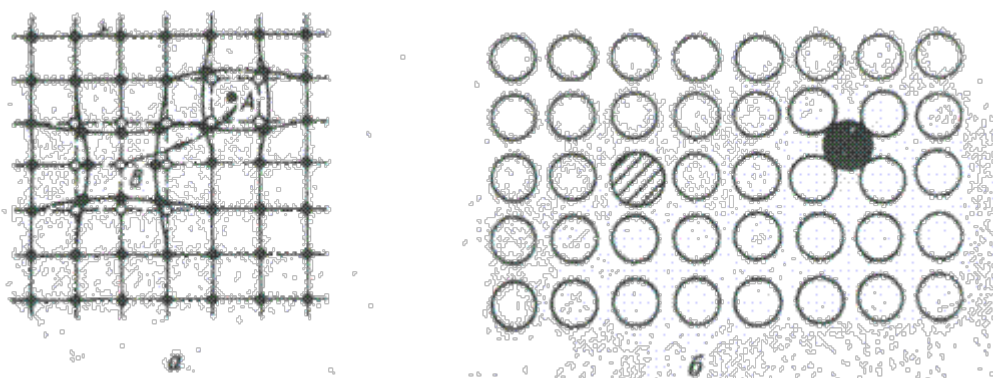


Рис. 4.2. Точечные дефекты в плоскости простой кубической решетки:

а – дислоцированный атом A и вакансия B ;
б – примесные атомы внедрения и замещения

Если экстраплоскость расположена сверху дислокации, то дислокацию называют положительной и обозначают знаком $\perp$. Дислокация является отрицательной, если экстраплоскость расположена под ней. В этом случае она обозначается знаком $\neg$.

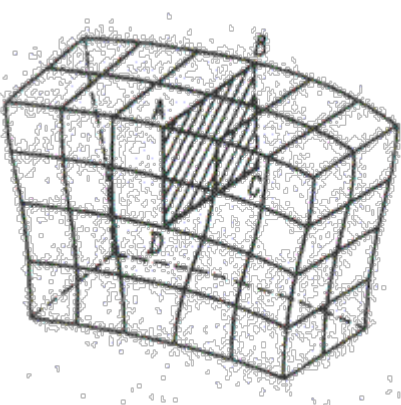


Рис. 4.3. Модель положительной краевой дислокации

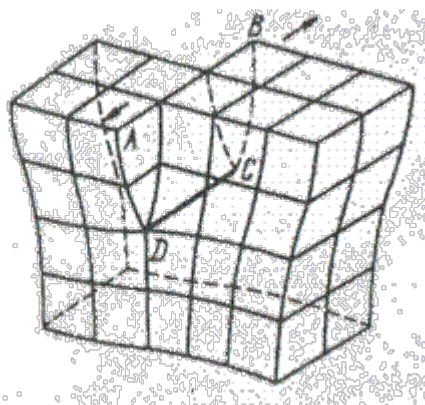


Рис. 4.4. Модель винтовой дислокации

Винтовая дислокация образуется при смещении части кристалла, разделенного плоскостью $ABCD$, относительно другой в направлении AB (рис. 4.4). Линия DC есть винтовая дислокация. В зависимости от направления движения дислокации бывают правого и левого вращения.

К линейным относятся смешанные дислокации, в которых содержатся части в виде краевой и винтовой дислокаций. Поверхностные дислокации – это дефекты, имеющие значительную протяженность в двух направлениях. К ним относятся границы между субзернами, зернами, межфазные границы, дефекты упаковки кристаллической решетки, скопление дислокаций в одной плоскости и др.

Объемные дефекты имеют протяженность во всех трех измерениях. К этим дефектам относится совокупность точечных, линейных и поверхностных дефектов, которые приводят к искажению кристаллической решетки в больших объемах кристалла. Кроме того, к объемным дефектам относятся наличие фаз, дисперсных выделений, различных включений, а также неравномерность распределения напряжений и деформаций в макрообъемах.

Наличие дефектов кристаллической решетки вызывает ее искажение. Мерой искаженности решетки является вектор Бюргерса, характеризующий энергию дислокации и силы, действующие на нее. Вектор Бюргерса – отрезок, замыкающий контур Бюргерса. Понятие о векторе и контуре Бюргерса дает [рис. 4.5](#). Контур Бюргерса строится путем последовательного обхода по часовой стрелке от атома к атому для части кристалла, содержащей дислокацию; такой же обход делается для кристалла, не содержащего дислокацию ([см. рис. 4.5, а, б](#)). Вектор, который необходимо ввести в совершенный кристалл для того, чтобы замкнуть контур Бюргерса (на [рис. 4.5, б](#) – это отрезок $M-Q$), и есть вектор Бюргерса.

Различают единичные, частичные и супердислокации, вектор Бюргерса которых соответственно равен межатомному расстоянию, меньше или больше его. В реальном кристалле, как правило, присутствуют все виды дислокаций.

Суммарная длина L_z всех дислокационных линий, отнесенная к объему V , представляет собой плотность дислокаций ρ :

$$\rho = L_z / V, \text{ см}^{-2}.$$

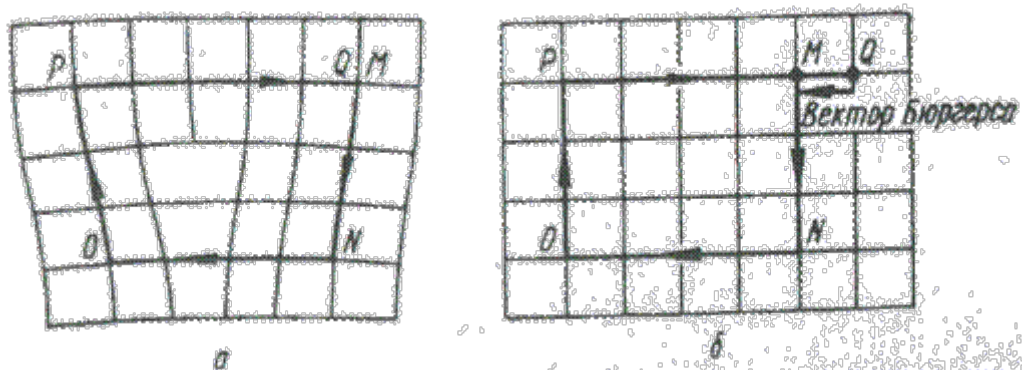


Рис. 4.5. Контур Бюргерса, включающий дислокации (а); тот же контур в совершенном кристалле (б)

ОБРАЗОВАНИЕ И РАЗМНОЖЕНИЕ ДИСЛОКАЦИЙ

Дислокации возникают при кристаллизации или охлаждении кристаллов после исчезновения жидкой фазы.

В теории дислокаций рассматриваются множественные механизмы возникновения дислокаций. Все они сводятся к возникновению локальных участков концентрации напряжений на границе твердых и жидких фаз. Эта концентрация возникает в результате термических градиентов, изменения состава и структуры кристалла, наличия примесей, вакансий, различных случайностей роста кристаллов, размножения зародившихся на первых этапах кристаллизации дислокаций и др. В поликристаллических телах, которыми обычно являются металлы, кристаллы (зерна) отличаются пространственной ориентацией. Внутри зерен существуют субзерна (блоки), разориентированные относительно друг друга на больший или меньший угол (менее 10°). Границы зерен и блоков являются источниками зарождения дислокаций. Решетки блоков упруго сопрягаются во всех областях, кроме тех, в которых находятся дислокации. Расстояние между дислокациями в границе

$$D = b / \alpha_3,$$

где b – вектор Бюргерса; α_3 – угол разориентировки зерен.

Возникновение дислокаций приводит к возникновению дефектов упаковки, т.е. нарушению чередования слоев кристаллической решетки.

Дислокации, возникшие при кристаллизации, имеют свойства размножаться или исчезать при пластической деформации, термообработке или других видах энергетического воздействия. Одна из

моделей размножения дислокаций при пластической деформации предложена Франком и Ридом. Механизм размножения дислокаций Франка – Рида может привести к значительному увеличению числа дислокаций, однако он не универсален, и существуют другие механизмы размножения. Среди них многократное поперечное скольжение, образование призматических петель, переползание, деформационное двойникование и др.

Пластическая деформация и [термическая обработка](#) приводят к увеличению [плотности дислокаций](#), типичные значения которой для различных состояний материала могут составлять, см⁻²:

- монокристаллы особо чистых веществ $10^2 \dots 10^4$;
- отожженные обычные монокристаллы $10^4 \dots 10^6$;
- отожженные поликристаллические металлы $10^7 \dots 10^8$;
- металлы после холодного пластического деформирования $10^9 \dots 10^{12}$;

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

[Разрушение](#) металлов и сплавов происходит путем образования и развития трещин. Оно осуществляется в несколько этапов: зарождение субмикротрещин (зародышевой трещины), слияние их в микро-, а затем в макротрещину, рост макротрещины и разделение металла на составные части.

Теория [дислокаций](#) объясняет механизм зарождения субмикротрещин, базируясь на нескольких моделях, показанных на [рис. 4.6](#).

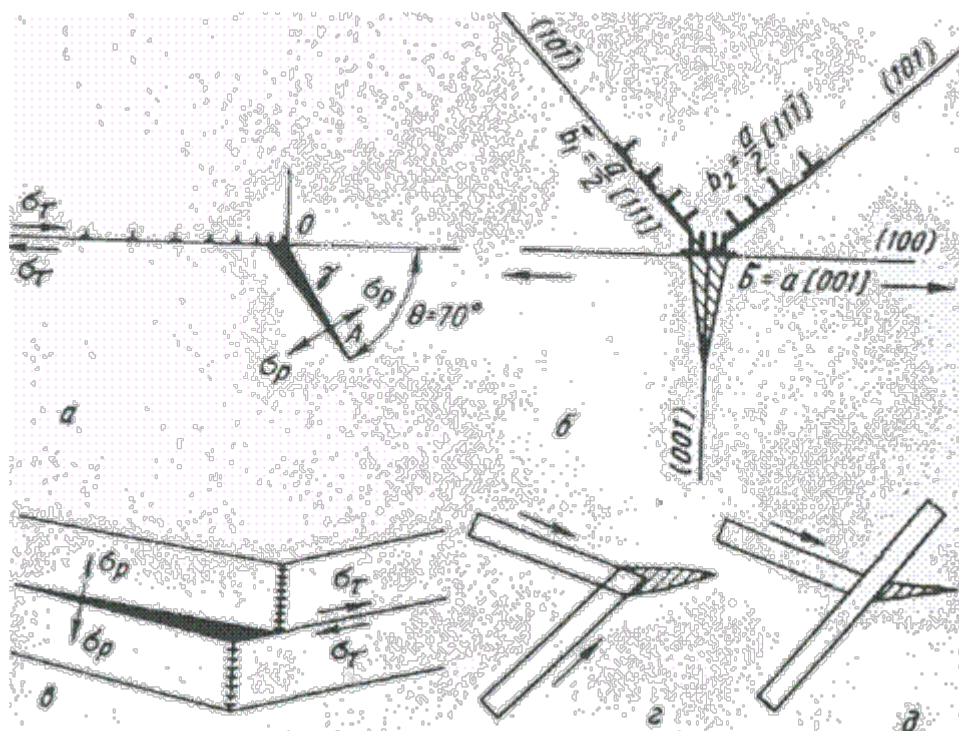


Рис. 4.6. Схема дислокационных механизмов образования субмикротрещин:

а – модель Зинера, Мотта и Стро; б – модель Коттрелла; в – модель разрыва дислокационной стенки; г – схема возникновения трещины при встрече двух двойников

Согласно простейшей модели (см. [рис. 4.6, а](#)), перед различными препятствиями (дислокационные стенки, границы двойников, субзерен, зерен, межфазные границы, инородные включения и т.д.) возникает сильное скопление дислокаций, а следовательно, [концентрация напряжений](#), что, приводит к образованию трещин, причем под углом 0-70° к плоскости скольжения.

Другой механизм, предложенный Коттреллом, объясняет возникновение трещин слиянием движущихся дислокаций с образованием раскалывающейся дислокации (см. [рис. 4.6, б](#)).

При наличии в кристалле малоугловых границ с большой ориентировкой возможно образование микротрещины за счет сдвига вдоль дислокационной стенки ([см. рис. 4.6, в](#)).

Существуют и другие дислокационные механизмы зарождения субмикротрещин ([см. рис. 4.6, г, д](#)), в основу которых положено представление о концентрации напряжений, создаваемых дислокациями. При межзеренной [деформации](#) возможно образование трещины на границах перемещающихся относительно друг друга зерен.

Субмикротрещины имеют размер порядка 10^{-1} мкм. Их рост происходит путем объединения с другими трещинами или взаимодействия с [вакансиями](#) и скоплениями дислокаций до образования микротрещины порядка 1 мкм.

КЛАССИФИКАЦИЯ УЗЛОВ ТРЕНИЯ

Для определения условий [изнашивания](#) деталей, работающих в узлах трения, с целью обоснованного применения отделочно-упрочняющей обработки для повышения [износостойкости](#) поверхностей требуется использование классификации узлов трения, учитывающей влияние параметров качества поверхностного слоя, образующегося в процессе изготовления деталей.

Все многообразие узлов трения можно классифицировать по следующим признакам.

Конструктивные характеристики: величина, характер и место приложения нагрузки; режим нагружения; вид рабочей среды; температура; характеристики контртела; габариты узла трения.

Эксплуатационные характеристики: требуемая [надежность](#); срок службы; требуемая точность и возможные пределы ее изменения; необходимость и возможность контроля работы; энергоемкость (коэффициент трения); шум; демпфирование; газовыделение; токсичность.

Экономические и технологические характеристики: объем производства; стоимость; затраты энергии и ресурсов; производительность; масса изделия; внешний вид и отделка.

Классификация видов изнашивания показана на [рис. 4.7](#).



Рис. 4.7. Классификация видов изнашивания

Многообразие происходящих в контактном слое изменений приводит к различным видам [износа](#). Полную характеристику вида износа нельзя определить одним термином, т.к. его название должно содержать несколько характеристик.

При постоянных условиях трения имеют место три стадии процесса изнашивания: приработка, период установившегося режима, катастрофический износ.

ЛЕКЦИЯ 5

Постановка задачи обеспечения качества поверхностного слоя.

Классификация методов отделочно-упрочняющей обработки деталей машин

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

Высокая [прочность](#) и [долговечность](#) конструкций при минимальной массе и максимальной надежности достигаются конструкторскими, металлургическими и технологическими методами.

Конструкторские методы предусматривают обеспечение равнопрочности высоконапряженных деталей. При их проектировании избегают резких перепадов жесткости, глубоких канавок, галтелей малого радиуса и других конструктивных концентраторов напряжений. Каждым конкретным условиям эксплуатации деталей соответствуют оптимальные конструктивные решения.

Наибольшую эффективность дают металлургические и технологические методы, цель которых — повышение механических свойств и качества материала деталей. Из механических свойств важнейшие — прочность материала, повышение которой при достаточном запасе пластичности и вязкости ведет к снижению материалоемкости конструкции и в известной степени к повышению ее [надежности](#) и долговечности.

[Прочность](#) зависит главным образом от легкости перемещения [дислокаций](#) кристаллической решетки металлов. В связи с этим современные методы повышения прочности материала основаны на создании такого структурного состояния, которое обеспечивало бы максимальную задержку (блокировку) [дислокаций](#). Для этого стремятся к увеличению плотности дислокаций, созданию дислокационных барьеров в виде границ зерен, субзерен, дисперсных частиц вторичных фаз, образованию полей упругих напряжений, искажающих [кристаллическую решетку](#).

Чем больше [плотность дислокаций](#), тем выше сопротивление пластическому деформированию. Дислокационные барьеры на пути движения дислокаций требуют дополнительного повышения напряжения для их продвижения и тем самым способствуют [упрочнению](#). Измельчение зерен до наноуровня (увеличение протяженности их границ) сопровождается уменьшением размеров зародышевых трещин и затруднением их развития. Трещины вынуждены изменять направление движения при переходе от одного зерна к другому, в результате чего увеличиваются их траектории и сопротивление движению, поэтому ударная вязкость повышается.

Вместе с тем повышение [прочности](#), основанное на уменьшении подвижности дислокаций, сопровождается снижением [пластичности](#), вязкости и, следовательно, надежности. Проблема повышения конструкционной прочности состоит не столько в повышении прочностных свойств, сколько в том, как при высокой прочности обеспечить высокое сопротивление вязкому разрушению, т.е. надежность материала [деталей](#).

Обеспечению надежности и формированию благоприятной структуры способствует рациональное легирование, измельчение зерна, повышение металлургического качества материала деталей.

Для повышения циклической прочности и [износостойкости](#) важно затруднить [пластическую деформацию](#) поверхности деталей. Это достигается технологическими методами поверхностного упрочнения.

Например, для нагруженных зубчатых колес, так же как и подшипников качения, основным эксплуатационным свойством является контактная выносливость, определяющая габариты зубчатой передачи и ресурс ее работы. Кроме высокой контактной выносливости, от зубчатых колес требуется сопротивление усталости при изгибе, износостойкость зубьев, устойчивость к схватыванию. Наиболее полно этим требованиям удовлетворяют стали, имеющие твердый [поверхностный слой](#), вязкую и достаточно прочную сердцевину, способную противостоять действию ударных нагрузок. Сочетание твердой поверхности и вязкой сердцевины достигается технологическими методами поверхностного упрочнения.

Выбор методов повышения сопротивления усталости зависит в основном от температуры эксплуатации деталей и среды, в которой они работают. При температуре нагрева до 250°C и наличии воздушной среды сопротивление усталости сталей и сплавов можно повысить прежде всего снижением шероховатости поверхности, применением методов [поверхностного пластического деформирования](#) и [химико-термической обработкой](#).

Повышение сопротивления коррозионной усталости деталей при работе в условиях высокой температуры нагрева и агрессивной среды можно достичь снижением шероховатости поверхности, нанесением [защитных покрытий](#), ионным легированием.

Износостойкость при больших давлениях (превышающих предел текучести на участках фактического контакта) и малых скоростях скольжения трущихся поверхностей в условиях граничного трения и умеренных температур можно повысить следующими методами: подбором материалов для пар трения, не склонных к взаимному схватыванию и способных к образованию устойчивых прочных защитных пленок вторичных структур; созданием защитных пленок травлением в растворах кислот и щелочей; фосфатизацией, сульфидированием; повышением [твердости](#) трущихся поверхностей закалкой, химико-термической обработкой, нанесением износостойких покрытий, [деформационным упрочнением](#).

Износостойкость при больших давлениях и скоростях скольжения трущихся поверхностей в условиях высоких температур рекомендуется повышать подбором теплоустойчивых материалов для пар трения (легированием в сочетании со специальной термообработкой); применением специальных [смазочных материалов](#) и различных присадок к ним (химически и физически активных веществ). Для каждого конкретного условия трения и изнашивания должна быть установлена оптимальная шероховатость трущихся поверхностей.

Деформационное упрочнение снижает износостойкость и коррозионную стойкость в условиях коррозионной среды. Коррозионная стойкость зависит от материала деталей и условий эксплуатации (температуры нагрева, величины напряжений и продолжительности их действия, а также от окружающей среды).

Для деталей из коррозионностойких сталей, работающих без [защитных покрытий](#) в воздушной среде, для защиты от окисления необходимо обеспечивать минимальную шероховатость поверхности. Образование на поверхности детали защитных покрытий — наиболее эффективный способ повышения сопротивления коррозии. Защитные покрытия изолируют поверхность материала детали от окружающей среды, препятствуют проникновению к ней агрессивных компонентов и тем самым предохраняют материал от коррозии и разрушения.

Изучение возможностей технологических методов обеспечения оптимальных параметров [качества поверхностного слоя](#) деталей показывает, что они позволяют изготавливать детали с заданными эксплуатационными свойствами.

Виды и назначение технологических методов поверхностного упрочнения деталей

Стремление к повышению [надежности](#) и [долговечности](#) деталей авиационных конструкций вызывает необходимость более широкого применения [упрочняющей технологии](#).

К упрочняющей технологии относят процесс или метод с целью повышения эксплуатационных свойств деталей путем изменения физико-механического состояния материала всего объема или [поверхностных слоев](#). В более узком смысле, дословно, целью упрочняющей технологии является упрочнение, под которым понимают повышение сопротивляемости материала детали [разрушению](#) или остаточной [деформации](#).

Опыт доводки и эксплуатации изделий показывает, что наиболее эффективным для повышения их работоспособности является обеспечение оптимальных параметров поверхностей и поверхностных слоев деталей, т.е. поверхностное упрочнение.

Итак, надежность и долговечность изделий зависит не только от их рациональной конструкции и качества материала, но и от [технологических процессов](#) изготовления деталей, определяющих состояние поверхностного слоя.

Существуют различные подходы к обеспечению качества поверхности. По одной из классификаций все известные методы [упрочнения](#) подразделяются на *6 основных классов*:

1. упрочнение с образованием пленки на поверхности;

2. с изменением химического состава поверхностного слоя;
3. с изменением структуры поверхностного слоя;
4. с изменением энергетического запаса поверхностного слоя;
5. с изменением микрогеометрии поверхности и наклепом;
6. с изменением структуры по всему объему материала

УПРОЧНЕНИЕ С ОБРАЗОВАНИЕМ ПЛЕНКИ НА ПОВЕРХНОСТИ

а) Осаждение химической реакции (окислирование, сульфидирование, фосфатирование, нанесение упрочняющего смазочного материала, осаждение из газовой фазы).

б) Осаждение из паров (термическое испарение тугоплавких соединений, катодно-ионная бомбардировка, прямое электронно-лучевое испарение, реактивное электронно-лучевое испарение, электронно-химическое испарение).

в) Электролитическое осаждение (хромирование, никелирование, электрофорез, никельфосфатирование, борирование, борохромирование, хромофосфатирование).

г) Напыление износостойких соединений (плазменное напыление порошковых материалов, детонационное напыление, электродуговое напыление, лазерное напыление, вихревое напыление, индукционное припекание порошковых материалов).

УПРОЧНЕНИЕ С ИЗМЕНЕНИЕМ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ МЕТАЛЛА

а) Диффузионное насыщение (борирование, цианирование, азотирование, нитроцементация и т.п.).

б) Химическое и физико-химическое воздействие (химическая обработка, ионная имплантация, электроискровая обработка и т.д.).

УПРОЧНЕНИЕ С ИЗМЕНЕНИЕМ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

а) Физико-термическая обработка (лазерная закалка, плазменная закалка);

б) Электрофизическая обработка (электроконтактная, электроэрозионная, магнитная обработка).

в) Механическая (упрочнение вибрацией, фрикционно-упрочняющая обработка, дробеструйная, обработка взрывом, термомеханическая, электромеханическая).

г) Наплавка легированным элементом (газовым пламенем, электрической дугой, плазмой, лазерным лучом, пучком ионов и т.д.).

УПРОЧНЕНИЕ С ИЗМЕНЕНИЕМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЗАПАСА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

а) Обработка в магнитном поле (термомагнитная обработка, импульсным магнитным полем, магнитным полем).

б) Обработка в электрическом поле.

УПРОЧНЕНИЕ С ИЗМЕНЕНИЕМ МИКРОГЕОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТИ И НАКЛЕПОМ

а) Обработка резанием ([точение](#), [шлифование](#), сверхскоростное резание);

б) Пластическое деформирование (накатывание, обкатывание, раскатывание, выглаживание, [вибронакатывание](#), вибровыглаживание, калибрование, центробежно-ударное упрочнение, виброударное и т.д.).

в) Комбинированные методы (анодно-механическая, поверхностное легирование с выглаживанием, резание с воздействием ультразвуковых колебаний, магнитно-абразивная обработка и т.д.).

УПРОЧНЕНИЕ С ИЗМЕНЕНИЕМ СТРУКТУРЫ ВСЕГО ОБЪЕМА МЕТАЛЛА

а) термообработка при положительных температурах (закалка, отпуск, улучшение, закалка ТВЧ, нормализация, термомагнитная обработка).

б) криогенная обработка (закалка с обработкой холодом, термоциклирование).

В промышленности чаще используется классификация по технологическому признаку, рассмотренная далее.

ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ

Цементация – процесс насыщения углеродом [поверхностного слоя](#) деталей из малоуглеродистой (до 0,3% С) стали в целях придания ему большей [твердости](#) при достаточно вязкой сердцевине детали.

В зависимости от среды, в которой протекает процесс, различают цементацию: а) в твердом; б) в газообразном; в) жидком карбюризаторе.

Глубина цементации – 0,5-2,3 мм.

Средняя скорость науглероживания – 0,08-0,1 мм/ч.

Температура – 950-980 °С.

В соответствии с изменением содержания углерода по глубине цементованный слой можно разделить на три зоны:

- заэвтектоидная (перлит + тонкая сетка цементита). $C = 1-1,1\%$;
- эвтектоидная (перлит). $C = 0,85\%$;
- доэвтектоидная (перлит + феррит).

Детали, прошедшие цементацию в твердом карбюризаторе, подвергают термической обработке, виды и режимы которой зависят от марки стали, глубины цементации, назначения детали и ее конфигурации.

Преимущества газовой цементации перед твердой:

- продолжительность процесса уменьшается в 1,5-2 раза;
- снижается себестоимость производства;
- регулирование цементованного слоя и содержания углерода;
- механизация процесса.

Жидкостную цементацию производят в расплавленных солях, содержащих активные добавки SiC и NaCN при температуре 820-900 °С.

Время – 20-40 мин.; – толщина цементованного слоя – 0,1-0,2 мм.

Время – до 2 часов; – толщина цементованного слоя – до 0,6 мм.

Применяют для мелких деталей.

Недостаток: неравномерность глубины цементации.

Преимущества:

- возможность производить закалку деталей непосредственно после цементации;
- отсутствие окалины и обезуглероживания поверхности.

Азотирование – процесс насыщения азотом [поверхностного слоя](#) деталей, извлеченных из черных [металлов](#).

Качество азотированного слоя определяется соотношением в нем структурных [фаз](#), зависящим от состава стали, температуры азотирования, времени выдержки, степени диссоциации аммиака.

Легирующие элементы: (алюминий, хром, молибден, ванадий) образует с азотом твердые и стойкие нитриды. Азотированию подвергают стали, содержащие в качестве легирующих элементов по крайней мере алюминий и хром.

Температура азотирования – 500 °С;

Скорость диффундирования азота вглубь – 0,01 мм/ч.

Время – 60-70 часов, глубина азотированного слоя – 0.6-0,7 мм.

Преимущества – азотированная поверхность обладает устойчивостью против коррозии на воздухе, в пресной воде, в паровоздушной среде, в газовой среде.

Недостатки – при азотировании детали увеличиваются в размерах и могут деформироваться. Поэтому азотированные детали подвергают либо [полированию](#), либо [шлифованию](#).

Применение: для изделий, от которых требуется высокая циклическая прочность, большая [твердость](#), [износостойкость](#) (коленчатые валы, цилиндры двигателей, поршневые кольца, седла клапанов, борштанги и др.).

Термодиффузионное хромирование – процесс насыщения поверхностного слоя стальных деталей хромом при температуре 950-1300 °С путем диффузии хрома в железо.

Три метода термохромирования: твердое; жидкое; газовое.

При температуре 1000 °С и выдержке в течение 3 часов толщина слоя около 0,06 мм; (7 часов и температуре 1100 °С толщина слоя – 0,08 мм.)

Твердость:

- для низкоуглеродистых сталей HV = 150-180;
- для среднеуглеродистых сталей HV= 190-300;
- для высокоуглеродистых сталей HV = 1300-1500.

Преимущества – поверхностный слой не подвергается коррозии на воздухе, в морской воде, электрохимической и газовой коррозии.

Недостатки – мало применяются для образования износостойкого покрытия из-за малой толщины слоя, большой длительности и сложности процесса.

Применение: анкерные болты, клапаны компрессоров, лопатки газовых турбин и т.д.

Силицирование – процесс насыщения кремнием на глубину 0,3-1 мм.

Методы: в порошкообразных смесях; в жидких средах; газовое; вакуумное.

Используется для повышения [износостойкости](#); коррозионной стойкости в морской воде; кислотостойкости в серной, соляной, азотной кислотах; окислительной стойкости.

Применение: аппаратура для химической промышленности, валы насосов, арматура, крепежные детали оборудования нефтяной промышленности, трубы судовых двигателей, детали водяных насосов и двигателей внутреннего сгорания.

Недостатки:

- предел прочности, ударная вязкость понижается;
- высокая [хрупкость](#);
- невозможность [обработки резанием](#).

Оксидирование – процесс искусственного образования оксидной пленки на поверхности [металла](#). Оксидирование применяется в машиностроении, морском судостроении, оптико-механической промышленности и др. для получения защитно-декоративного покрытия изделий из черных металлов, алюминия, меди, магния, цинка и их сплавов, а также для получения тонких электроизоляционных слоев.

Оксидная пленка черных металлов состоит из мельчайших кристаллов окиси железа Fe₃O₄, имеет толщину до 0,003 мм, хорошо удерживает смазочные материалы, предупреждает [заедание](#) в парах трения их черных металлов и ускоряет приработку трущихся поверхностей за счет образования при истирании тончайших абразивов.

На алюминий и его сплавах получают пленки толщиной 0,003-0,0003 мм.. Оксидированный слой образуется как за счет углубления в толщину металла, так и за счет наращивания пленки на его поверхности. Анодное покрытие можно притирать и полировать.

Анодированный слой плохо работает в парах с электролитическим хромовым покрытием.

Фосфатирование – процесс образования на поверхности металла пленки нерастворимых фосфорнокислых солей. Фосфатирование производят химическим (в ванне либо в струе раствора) или

электрохимическим способом. Температура ванны для черных металлов менее 90 °С. Толщина пленки – 0,002-0,050.

Фосфатная пленка незначительно изменяет размеры изделия, прочно сцепляется с основанием, не смачивается расплавленным металлом, жаростойка до температуры 600 °С, устойчива в атмосферных условиях и смазочных маслах и газах, обладает малой [твердостью](#), невысокой механической [прочностью](#) и эластичностью, прочно удерживает смазочные масла, лаки и краски.

Фосфатирование используют как коррозиестойкое покрытие, но может применяться и как приработочное; обладает электроизоляционными свойствами.

Недостаток: возрастает хрупкость стали.

Сульфидирование – термохимический процесс обработки изделий, изготавливаемых из сплавов на железной основе, для обогащения поверхностных слоев серой.

Сульфидирование производят в жидкой, твердой или газовой серосодержащей среде. Оно может быть низко-, средне-, высокотемпературным: 150-450; 540-580; 850-950 °С. в поверхностном слое образуются фазы FeS и FeS₂.

Шероховатость поверхности после сульфидирования значительно выше исходной; размеры деталей несколько увеличиваются.

Эффект сульфидирования: сульфидная пленка, имеющая меньшую плотность, чем основной металл, легко разрушается при тернии и отделяется от основания без его пластического деформирования, предотвращая схватывание трущихся поверхностей. Продукты износа активизируют действие смазочного масла. Все это ускоряет приработку поверхностей и обеспечивает малую шероховатость после приработки.

ГАЛЬВАНИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Электролитическое хромирование применяется для повышения износостойкости стальных изделий: в ремонте и производстве самолетов, автомобильных и тракторных двигателей, деталей судовых механизмов, горных машин, металлорежущих станков, мерительного и режущего инструмента и т.д.

Хром отличается высокой [твердостью](#), большой прочностью сцепления со сталью и химической стойкостью.

Хромовое покрытие плохо смачивается маслами, поэтому для усиления смачиваемости хромовых покрытий прибегают к созданию на поверхности покрытия пор, углублений или каналов.

Виды износостойких хромовых покрытий: гладкий хром, осажденный на поверхность с механически нанесенными углублениями (хром по накатке); пористый хром; пятнистый хром.

Толщина хромового покрытия: ее назначают в зависимости от назначения детали и требуемого срока службы.

Например: толщина покрытия напильников, сверл, долбяков – 0,05 мм, пресс-форм для пластмасс – 0,01 мм; матриц – 0,05 мм; подшипников скольжения, валов насосов, поршневых пальцев – 0,2 мм.; поршневые кольца автотракторных двигателей – 0,1-0,15 мм.

Хромированные поверхности целесообразно *применять* при работе в паре с баббитами, мелкозернистым чугуном и с деталями из мягких и среднезакаленных сталей при наличии смазочного масла. *Не рекомендуется* хромировать детали, работающие в паре с титаном.

Железнение – процесс электромагнитического осаждения железа. Осаждение происходит из водных растворов закисных солей железа, используют хлористые, сернокислые и смешанные электролиты. Железо осаждают на катоде. Анодом служат прутки или полосы малоуглеродистой стали с содержанием углерода до 0,1%.

Железнение используют для повышения [износостойкости](#) клише и др.; как средство наращивания металла на изношенную поверхность стальных и чугунных деталей при восстановлении их размеров.

Электрохимическое упрочнение основано на сочетании термического и силового воздействия на [поверхностный слой](#) обрабатываемой детали. Сущность этого способа заключается в том, что в процессе обработки через место контакта инструмента с изделием проходит ток большой силы и низкого напряжения, вследствие чего выступающие гребешки поверхности подвергаются сильному нагреву, под давлением инструмента деформируются и сглаживаются, а поверхностный слой металла упрочняется.

Различают высокотемпературную термомеханическую обработку, где деформирование происходит при температуре выше порога рекристаллизации, и низкотемпературную термомеханическую обработку, где деформирование происходит при температуре ниже порога рекристаллизации. Для железа температура рекристаллизации 450-600 °С.

Особенности:

- тепловое и силовое воздействие на поверхностный слой осуществляется одновременно, а не последовательно; нагрев при этом сопровождается действием значительных давлений;
- нагрев [поверхностного слоя](#) металла от действия двух источников теплоты: внешнего (теплота трения) и внутреннего (теплота, выделяемая при прохождении тока). Особенностью второго источника является то, что теплота от него создается одновременно и мгновенно во всем поверхностном слое;
- длительность нагрева и выдержки в зависимости от поверхности контакта и скорости обработки весьма кратковременна (сотые и тысячные доли секунды);
- высокая скорость охлаждения определяется интенсивным отводом теплоты от тонкого поверхностного слоя вовнутрь детали;
- поверхностный подвергается многократным термомеханическим воздействиям в зависимости от числа рабочих ходов.

Термомеханическая обработка представляет собой сложный процесс [пластической деформации](#), при котором в поверхностном слое увеличивается [плотность дислокаций](#), величина микронапряжений, изменяется [структура](#).

Применение: обработка зубчатых колес, цилиндров, плоских поверхностей (станины), винтовых поверхностей и т.д.

изделий для повышения класса чистоты их поверхности, доводки изделий до требуемых размеров, получения определённых свойств поверхностного слоя, а также для придания их поверхности декоративного блеска. П. представляет собой совокупность процессов пластической микродеформации и тонкого диспергирования поверхностного слоя обрабатываемого изделия, происходящих при воздействии на этот слой полировальными и доводочными материалами.

ЛЕКЦИЯ 6

Основные методы поверхностного пластического деформирования (ППД)

КЛАССИФИКАЦИЯ И ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ ППД

Методы ППД подразделяют на статические и ударные. При статических методах обработки [инструмент](#), рабочие тела или среда воздействуют на обрабатываемую поверхность с определенной постоянной силой P , происходит плавное перемещение очагов воздействия, которые последовательно проходят всю поверхность, подлежащую обработке. При этом инерционные силы не оказывают существенного влияния на ППД.

При ударных методах инструмент, рабочие тела или среда многократно воздействуют на всю обрабатываемую поверхность или на ее часть, при этом сила воздействия P в каждом цикле изменяется от нуля или от некоторого значения P_1 до максимума.

Статические методы ППД обеспечивают меньшую шероховатость поверхности с благоприятной формой микронеровностей; с помощью ударных методов можно достичь большей степени [упрочнения](#). Однако обработка некоторыми ударными методами уступает по степени упрочнения обработке статическими методами, например, при виброударной обработке степень упрочнения бывает обычно меньше, чем при накатывании.

Обработка ППД имеет по сравнению с [точением](#), [шлифованием](#) и [полированием](#) ряд преимуществ:

- охраняется целостность волокон металла и образуется мелкозернистая структура-текстура в [поверхностном слое](#);
- отсутствует шаржирование обрабатываемой поверхности частичками шлифовальных кругов, полировочных паст;
- отсутствуют термические дефекты;
- стабильны процессы обработки, обеспечивающие стабильное качество поверхности;
- можно достигать минимального параметра шероховатости $R_a=0,1-0,05$ мкм и менее как на сырых сталях, чугунах, цветных сплавах, так и на высокопрочных закаленных материалах, сохраняя исходную форму заготовок;
- можно уменьшить шероховатость поверхности в несколько раз за один рабочий ход;
- создается благоприятная форма микронеровностей с большей долей опорной площади;
- можно образовывать применением некоторых методов регулярные микрорельефы с заданной площадью углублений для задержания [смазочного материала](#);
- создаются благоприятные сжимающие [остаточные напряжения](#) в поверхностном слое;
- плавно и стабильно повышается микротвердость исходной поверхности.

ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ПОВЕРХНОСТНО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ (ППД)

ППД – это обработка деталей давлением (без снятия стружки), при которой пластически деформируется только их поверхностный слой. ППД осуществляется инструментом, деформирующие элементы (ДЭ) которого (шарики, ролики или тела иной конфигурации) взаимодействуют с обрабатываемой поверхностью по схемам качения, скольжения или внедрения.

При ППД по схеме качения ДЭ (как правило, ролик или шарик) прижимается к поверхности детали с фиксированной силой P (рис. 6.1 а), перемещается относительно нее, совершая при этом вращение вокруг своей оси. В зоне локального контакта ДЭ с обрабатываемой поверхностью возникает очаг пластической деформации (далее – очаг деформации – ОД), который перемещается вместе с инструментом, благодаря чему поверхностный слой последовательно деформируется на глубину h (рис. 6.1 б), равную глубине распространения ОД. Размеры ОД зависят от технологических факторов обработки – силы P , формы и размеров ДЭ, подачи, твердости обрабатываемого материала и др.

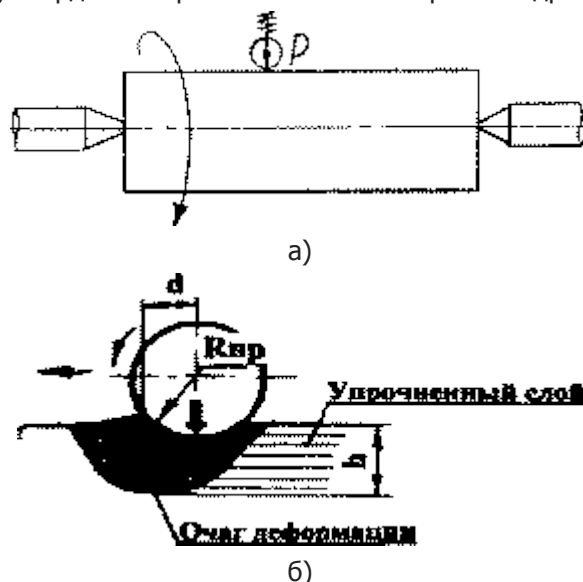


Рис. 6.1. Схема обработки детали по схеме качения

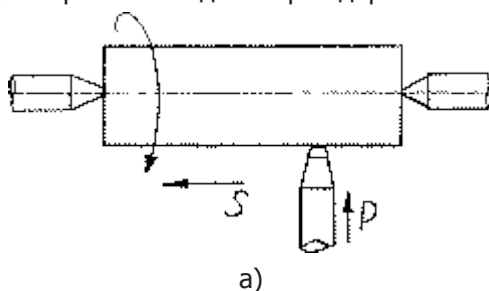
В соответствии с ГОСТ 18296-72 поверхностное пластическое деформирование при качении инструмента по поверхности деформируемого материала называется *накатыванием*. В свою очередь, накатывание подразделяется на *обкатывание* и *раскатывание* в зависимости от того, какие поверхности обрабатываются: выпуклые (валы, галтели), плоские или вогнутые (например, отверстия).

Достоинством накатывания является снижение сил трения между инструментом и обрабатываемым материалом.

К методам ППД, в которых ДЭ работают по схеме скольжения, относятся выглаживание и дорнование. Для этих процессов ДЭ должны изготавливаться из материалов, имеющих высокую твердость (алмаз, твердый сплав и т.п.) и несклонных к адгезионному схватыванию с обрабатываемым материалом.

Алмазное выглаживание применяется для ППД закаленных сталей и деталей маложестких, т.е. тогда, когда невозможно применить обработку накатыванием (рис. 6.2). Недостатком выглаживания является низкая производительность и невысокая стойкость инструмента.

Дорнование – это деформирующее протягивание, калибрование, применяется для обработки отверстий (рис. 6.3). Это высокопроизводительный процесс, сочетающий в себе возможности чистовой, упрочняющей, калибрующей и формообразующей обработки. Формообразующая обработка применяется для получения на поверхности детали мелких шлицов и других рифлений. Толщина упрочненного слоя при дорновании регулируется натягом, т.е. разностью диаметров дорпа «D» и отверстия «d» заготовки.



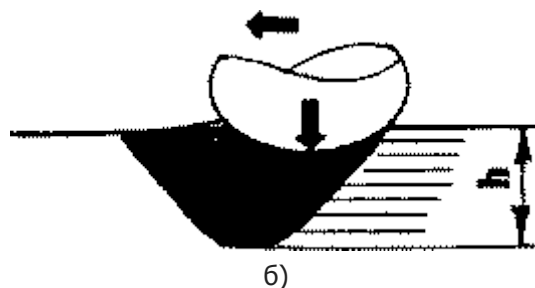


Рис. 6.2. Схема обработки детали алмазным выглаживанием

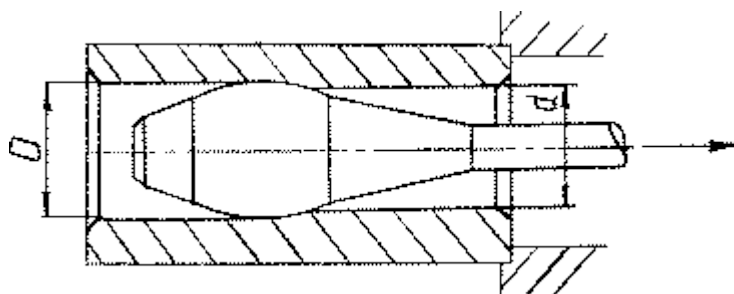


Рис. 6.3. Дорнование

Методы накатывания, выглаживания и деформирующего протягивания относятся к методам *статического поверхностного деформирования*. Характерным признаком этих методов является стабильность формы и размеров ОД в стационарной фазе процесса.

Наряду с этими методами в машиностроении существует большое число методов ППД, основанных на динамическом (ударном) воздействии инструмента на поверхность детали ([рис. 6.4](#)). В этих процессах инструмент внедряется в [поверхностный слой](#) детали перпендикулярно профилю поверхности или под некоторым углом к ней. Многочисленные удары, наносимые инструментом по детали по заданной программе или хаотично, оставляют на ней большое число локальных пластических отпечатков, которые в результате покрывают (с перекрытием или без него) всю поверхность. Размеры очага деформации зависят от материала детали, размеров и формы инструмента и от энергии удара по поверхности.

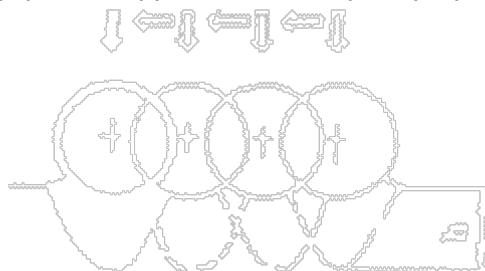


Рис. 6.4. Схема обработки ППД при ударном воздействии инструмента

К методам *ударного ППД* относятся чеканка, обработка дробью, виброударная, ультразвуковая, центробежно-ударная обработка и др.

Дробеструйная обработка ([наклеп](#)) осуществляется за счет кинетической энергии потока чугунной, стальной или другой дроби, который направляется например, роторным дробебетом ([рис. 6.5](#))

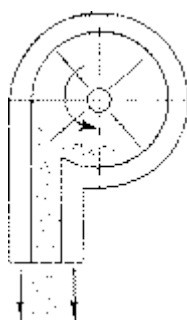


Рис. 6.5. Дробеструйная обработка детали

Центробежно-шариковая обработка осуществляется за счет кинетической энергии стальных шариков (роликов), расположенных на периферии вращения диска ([рис. 6.6](#)).

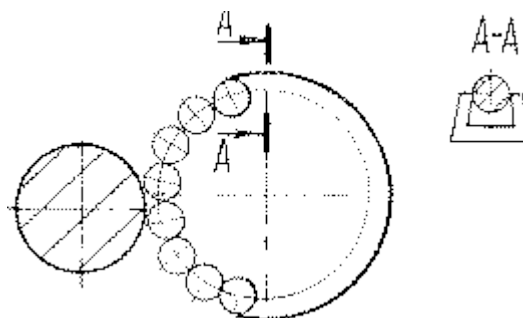


Рис. 6.6. Центробежно-шариковая обработка

При вращении диска под действием центробежной силы шарики отбрасываются к периферии обода, взаимодействуют с обрабатываемой поверхностью и отбрасываются внутрь гнезда.

Поверхностное пластическое деформирование:

- повышает [плотность дислокаций](#) в упрочненном слое;
- измельчает исходную [структуру](#);
- повышает величину [твердости](#) поверхности;
- уменьшает величину [шероховатости](#);
- повышает износостойкость деталей.

При поверхностном пластическом деформировании:

- возрастает сопротивление схватыванию;
- увеличивается предел выносливости.

ФОРМИРОВАНИЕ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ОБКАТЫВАНИИ РОЛИКОМ

Форма и размеры очага деформации, профиль его контактных и внеконтактных зон входят в граничные условия для [напряжений](#) и скоростей деформаций и отражают суть механических явлений, протекающих в ОД при обработке.

Кроме того, исследование контактных и внеконтактных зон очага деформации позволяет получить информацию о характере пластического волнообразования и роли волны в искажении площадки контакта [инструмента](#) с [деталью](#), о характере изменения исходной шероховатости, наличии шелушения поверхности, дефектах инструмента и т.п.

Рассмотрим процесс обкатывания цилиндрического вала тороидальным роликом ([рис. 6.7](#)). Обозначим диаметр детали D_d , диаметр ролика – D_r и радиус ролика – R . Подачу ролика на оборот вала обозначим S_z , частоту вращения вала – ω , радиальную силу обкатывания – P_r , профильный.

При обкатывании в зоне контакта инструмента с деталью возникает локальный ОД, размеры которого зависят от технологических факторов. В результате сложения двух движений – вращения детали и осевой подачи инструмента – ОД приобретает асимметричную форму.

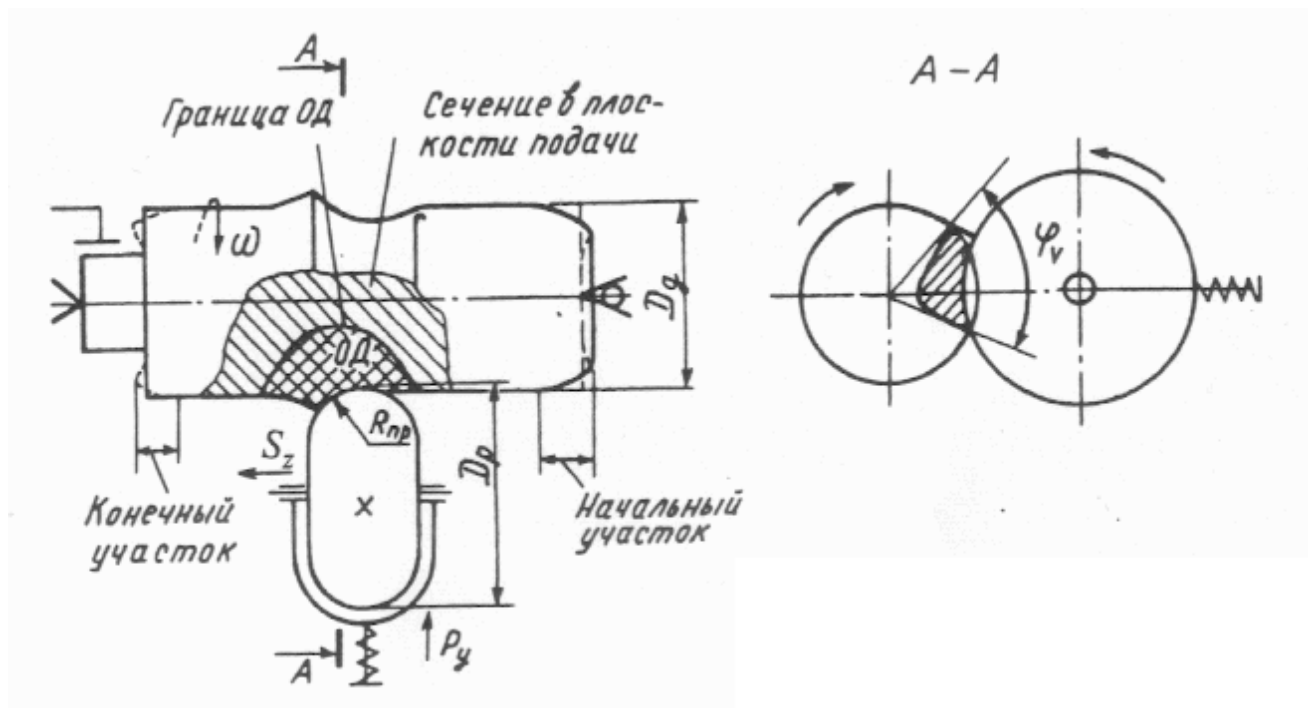


Рис. 6.7. Схема обкатывания вала цилиндрическим роликом

Наряду с контактной поверхностью ОД имеет внеконтактные в виде наплывов металла вокруг контактной поверхности.

С методической точки зрения представляется важным выбор направления измерения наплывов. Используется два направления измерения – вдоль векторов [скорости](#) и [подачи](#), в связи с чем вводится понятие продольной и поперечной волн. Это оправдано, если речь идет о форме площадки контакта инструмента с деталью.

На наш взгляд, степень [деформации](#) поверхностного слоя в рассматриваемых процессах ППД взаимосвязана с размерами продольной волны.

В пользу такой точки зрения можно привести и ряд других соображений:

- понятие волны в геометрическом плане четко фиксировано;
- геометрические параметры волны могут быть сравнительно просто измерены;
- высота волны в продольном направлении имеет значительно большие размеры, чем в поперечном;
- плоскость подачи с механической точки зрения в большей степени отвечает понятию главной плоскости потому, что, как показали наши исследования (см. ниже), компоненты деформации в плоскости скорости вращения меньше аналогичных компонент в плоскости подачи.

Это обстоятельство является важной особенностью процесса обкатывания, указывающей на то, что скорость деформирования (плоскость скорости вращения) не совпадает со скоростью деформации. При локальном деформировании «в отличие от традиционных случаев прокатки наибольшее влияние на величину контактных [напряжений](#) оказывает не протяженность контактной поверхности в направлении прокатки, а ширина, т.е. размер в направлении наибольшей поперечной деформации». Это значит, что наибольшее влияние на деформацию и контактные напряжения оказывает не протяженность площадки контакта в направлении скорости вращения, а ее длина в направлении подачи.

Профилограммы ОД можно записывать при движении [датчика](#) с опорой на базовую поверхность, выставленную параллельно измеряемой поверхности.

Для исследования ОД больших размеров, возникающих при интенсивных режимах обработки, применяется или кусочный метод профилографирования стандартным датчиком с последующим составлением одной профилограммы из нескольких, или профилографирование с применением специальной насадки к датчику, позволяющей уменьшить вертикальное увеличение в 10 раз ([рис. 6.8](#)).

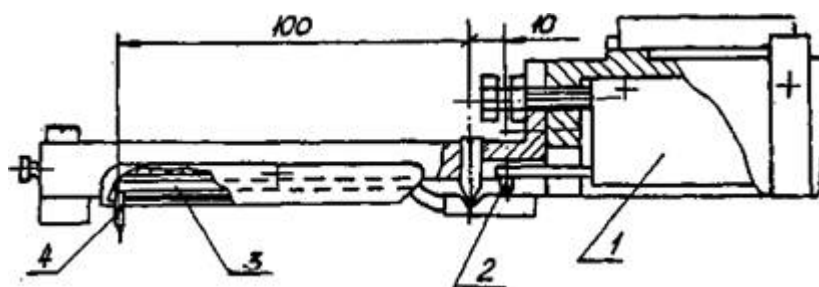


Рис. 6.8. Специальная насадка к датчику:

1 – штатный датчик профилометра-профилографа «Калибр-201»; 2 – алмазная игла штатного датчика; 3 – коромысло; 4 – алмазная игла коромысла

При экспериментах ОД фиксировался путем «мгновенной» остановки процесса обработки в определенном по длине детали месте. Мгновенность остановки – понятие условное, хотя и имеющее принципиальное значение с позиций точности определения ОД и ответа на вопрос: какую долю искажений профиля ОД вносят упругая и [пластическая деформации](#), возникающие в период разгрузки и остановки процесса?

Сопоставление профилограмм рабочей части инструмента и очага деформации показало, что после отвода инструмента искажение профиля очага деформации незначительно. Например, при алмазном [выглаживании](#) заготовки из стали 45 с радиальной силой 900 Н упругое восстановление впадины очага деформации не превышало 17%. Данное число также включает погрешность, связанную с искажением ОД при остановке процесса обработки. Эту составляющую погрешности можно уменьшить, если при остановке процесса сначала выключить вращение, затем подачу и быстро отвести [инструмент](#).

Дислокации в кристаллах - дефекты кристалла, представляющие собой линии, вдоль и вблизи которых нарушено характерное для кристалла правильное расположение атомных плоскостей. Д. и другие дефекты в кристаллах определяют многие физические свойства кристаллов, называемые структурно-чувствительными. В частности, механические свойства кристаллов — прочность и пластичность — обусловлены существованием Д. и их особенностями.

ЛЕКЦИЯ 7

Численная модель ППД. Основы теории упрочняемого жесткопластического тела

Поверхностный слой при обработке ППД формируется в результате пластических деформаций, изменения прочностных и пластических свойств деформируемого материала, трения и тепловых процессов, изменения микро- и макроструктуры.

При обработке методами ППД происходит пластическая деформация поверхностного слоя детали, в процессе которой большую роль играют искажения кристаллической решетки. Искажения (дефекты) кристаллической решетки являются причиной значительного расхождения между величинами теоретического и реального сопротивлений сдвигу. В искажениях кристаллической решетки возникает пластическая деформация, которая распространяется по кристаллическим плоскостям. Внутри зерен происходит интенсивное образование и движение дислокаций. Движущиеся дислокации, встречаясь с препятствиями, например, с дислокациями, расположенными в другой плоскости, блокируются, т.е. закрепляются. При пластической деформации происходит дробление кристаллов на фрагменты и блоки с большими искажениями кристаллической решетки на их границах. Это ведет к увеличению числа границ, около которых задерживаются дислокации, что в свою очередь, увеличивает сопротивление деформированию. Это обстоятельство и является причиной упрочнения металлов при пластическом деформировании. В процессе обкатывания величина деформирующих напряжений снижается по мере удаления от контактной поверхности и приводит к их затуханию. Наиболее упрочненной оказывается верхняя часть пластически деформированного слоя. Физические свойства металла в поверхностном слое изменяются: повышаются твердость, предел прочности и предел текучести.

Упрочнение при пластическом деформировании зависит от удельных напряжений и размеров контактной площади между шаровым инструментом и обрабатываемой поверхностью.

Увеличение скорости при обкатывании приводит к изменению степени и градиента наклепа. Поверхностный слой получает более сильное упрочнение, хотя глубина его снижается.

Основные параметры ППД следующие: упругая и пластическая деформации в очаге деформирования, площадь контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью, сила воздействия на инструмент, напряжения, возникающие под действием этой силы, и кратность приложения силы.

Как при статическом, так и при ударном воздействии на обрабатываемой поверхности в первоначальный момент образуется отпечаток от инструмента, который затем превращается в примыкающие друг к другу следы или в серию отпечатков.

Выглаживание является одним из методов отделочно-упрочняющей обработки поверхности пластическим деформированием и заключается в пластическом деформировании обрабатываемой поверхности скользящим по ней инструментом – выглаживателем, закрепленным в оправке алмазным кристаллом, который обладает следующими свойствами:

- высокая твердость;
- низкий коэффициент трения;
- высокая степень чистоты;
- высокая теплопроводность.

Выглаживание производится: для уменьшения шероховатости поверхности (отделка), упрочнения поверхностного слоя, повышения точности размеров и форм деталей (калибрование).

На рис. 7.1 показана деформация поверхностного слоя при движении выглаживателя в направлении скорости. Прижатый к обрабатываемой поверхности с силой P_y инструмент внедряется в нее на глубину R_d и при своем движении сглаживает исходные неровности.

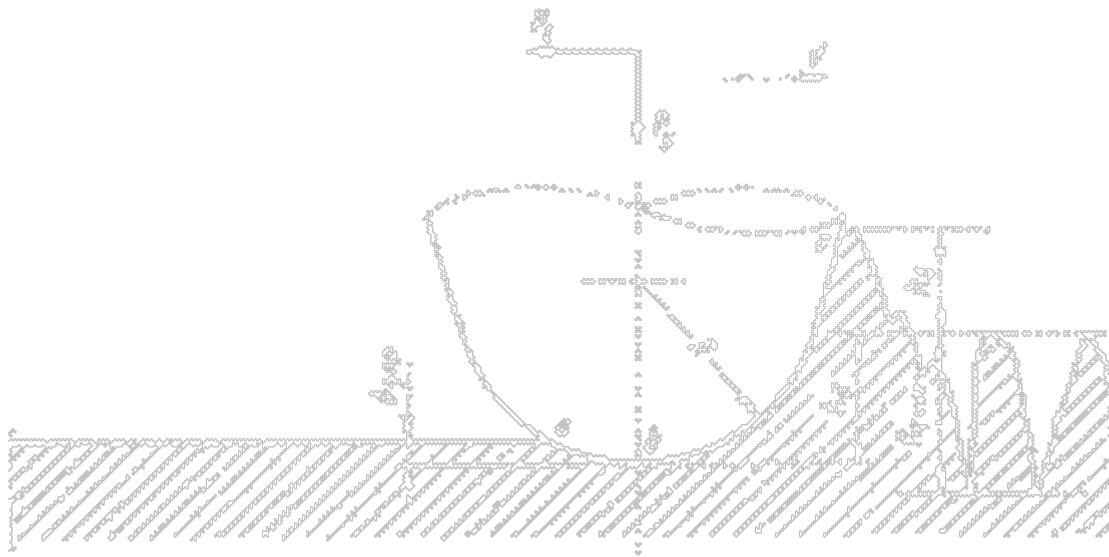


Рис. 7.1. Схема деформации поверхности при выглаживании.

Высота шероховатости в направлении скорости (продольная шероховатость) обычно значительно меньше, чем высота поперечной шероховатости (в направлении подачи). После прохода инструмента происходит частичное упругое восстановление поверхности на величину $\Delta_{уп}$. Контакт инструмента с обрабатываемой поверхностью в сечении происходит по дуге авс (см. рис. 7.1). Вследствие того, что впереди выглаживателя образуется валик пластически деформированного металла R_b , передняя поверхность выглаживателя нагружается гораздо больше (контакт по дуге вс), чем задняя поверхность (контакт по дуге ав). По этой причине, а также вследствие адгезионного взаимодействия между деталью и инструментом в процессе выглаживания возникает тангенциальная составляющая силы P_z .

Рассмотрим теперь [деформацию](#) поверхностного слоя в направлении [подачи](#) (рис. 7.2).

При продольном перемещении выглаживатель раздвигает металл деформируемых поверхностных неровностей в стороны. При этом со стороны исходной поверхности образует валик деформированного [металла](#) h_b , а со стороны выглаженной поверхности происходит искажение профиля канавок, образовавшихся при предыдущих оборотах детали, в результате пластического течения металла, выдавливаемого из-под выглаживателя в сторону выглаженной поверхности. В наибольшей степени искажается профиль канавки, образованной на предыдущем обороте.

После каждого оборота обрабатываемой детали канавка – след выглаживателя перемещается в осевом направлении на величину подачи S . При этом происходит многократное перекрытие ее при последующих обработках обрабатываемой детали, т.к. ширина канавки больше величины подачи. Контакт выглаживателя с обрабатываемой поверхностью происходит по дуге def. Вследствие того, что со стороны невыглаженной поверхности образуется валик деформированного металла h_b , правая полуповерхность (в направлении подачи) нагружена гораздо больше (контакт по дуге ef), чем левая полуповерхность (контакт по дуге de). Поэтому в процессе выглаживания возникает осевая сила P_x .

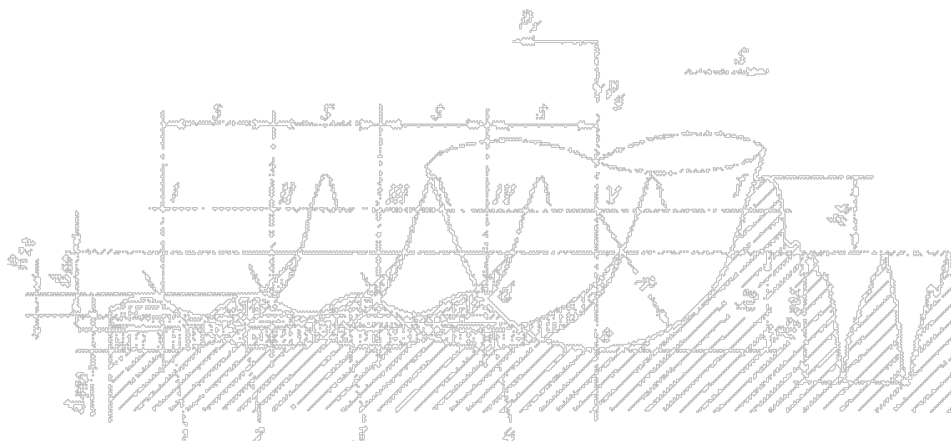


Рис. 7.2. Схема деформации поверхности при выглаживании

I-V – последовательные положения выглаживания после каждого оборота детали; 1 – профиль следа положения выглаживателя; 2 – фактический профиль выглаженной поверхности; 3 – упругое восстановление поверхности; 4 – пластическое искажение профиля.

В результате пластического деформирования обрабатываемой поверхности происходит сглаживание исходных неровностей и образование нового микрорельефа поверхности со значительно меньшей высотой неровностей R_{ZB} . Размер детали уменьшается на величину остаточной деформации $\Delta_{пв}$. На величину и форму образующихся неровностей влияет также неоднородность шероховатости поверхности и [твердости](#) обрабатываемой поверхности, колебания силы выглаживания, вызванные биением детали и др. это вызывает отклонение реального микрорельефа от полученного.

Образующийся в результате алмазного выглаживания микрорельеф поверхности обуславливается следующими факторами:

- кинематикой процесса (направлением взаимного перемещения [инструмента](#) и обрабатываемой [детали](#));
- величиной исходной шероховатости;
- формой и размером рабочей части алмаза;
- величиной внедрения алмаза в обрабатываемую поверхность;
- пластическим течением материала, обуславливающим появление вторичной шероховатости;
- шероховатостью рабочей части алмаза;
- величиной упругого восстановления поверхности после выглаживания;
- вибрациями системы [СИД](#).

Формирование поверхностного слоя при алмазном выглаживании происходит вследствие пластического деформирования обрабатываемой поверхности. Под действием радиальной силы, действующей на поверхность контакта алмаза с деталью, возникают контактные давления. Если их величина превышает предел текучести, возникает пластическая деформация тонких поверхностных слоев. При пластической деформации поверхностный слой имеет специфическое волокнистое строение (текстуру), исходная [кристаллическая решетка](#) искажается.

Эффективность алмазного выглаживания различных материалов в значительной мере определяется их исходной [структурой](#).

Исследованиями установлено, что при выглаживании наиболее интенсивно возникает деформация в феррите, менее интенсивно – в перлите и мартенсите.

Высокая эффективность [упрочнения](#) объясняется более высокой плотностью дефектов, образующихся в поверхностном слое, за счет концентрации дислокаций. При этом создается тонкое структурное состояние металла, которое обеспечивало бы максимальную задержку дислокаций и минимальный их выход на поверхность. При алмазном выглаживании [плотность дислокаций](#) в поверхностном слое близка к предельному значению. С увеличением расстояния от поверхности плотность дислокаций уменьшается.

Особенность процесса алмазного выглаживания: если при других видах упрочнения полностью или частично удаляется слой металла, деформированный на предыдущей операции, то при алмазном выглаживании этот слой не удаляется, а претерпевает дополнительную упругопластическую деформацию.

Силы, возникающие при алмазном выглаживании

При выглаживании сила P раскладывается на составляющие: нормальную P_y , тангенциальную P_z и силу [подачи](#) P_x .

Величина сил выглаживания зависит от радиуса формы рабочей части выглаживателя, пластичности и шероховатости обрабатываемой поверхности, от глубины внедрения выглаживателя, подачи и др.

$$P_x = C_x R^{0.5} h^{4.5} \sigma_T;$$
$$P_y = C_y R h \sigma_T;$$

$$P_z = C_z R^{0,5} h^{1,5} \sigma_T,$$

где: C_x ; C_y ; C_z – коэффициенты, учитывающие конкретные условия обработки;

R – радиус рабочей части выглаживателя;

h – глубина внедрения выглаживателя;

σ_T – предел текучести обрабатываемого материала.

Исследованиями установлено, что основной силой, создающей необходимое давление в зоне контакта инструмента с деталью, является нормальная составляющая P_y . Составляющие P_x и P_z в 10-20 раз меньше P_y . Поэтому в качестве силы выглаживания принимают P_y . Для расчетов берут:

$$P = C \varepsilon \sigma_T R^2,$$

где: $\varepsilon = h/R$.

Так как величина σ_T неудобна для расчетов, то удобнее выражать сопротивление деформации поверхностного слоя металла через величину его твердости HV .

Заменим R приведенным радиусом

$$R = \left(\frac{DR}{D + R} \right)^2.$$

D – диаметр обрабатываемой [детали](#).

Окончательно:

$$P = \pi \varepsilon HV \left(\frac{DR}{D + R} \right)^2.$$

Трение и смазка

Качество поверхности обработанных выглаживанием деталей в значительной степени зависит от характера взаимодействия материала детали и [инструмента](#) в зоне контакта. Увеличение [коэффициента трения](#) ведет к интенсивному изнашиванию инструмента и снижению качества обрабатываемой поверхности.

Коэффициент трения при алмазном выглаживании зависит от:

- свойств материала;
- силы выглаживания;
- радиуса алмаза;
- формы и особенностей контакта.

Коэффициент трения f при выглаживании включает в себя деформацию $f_{деф.}$ и адгезионную $f_{адг.}$. Составляющие:

$$f = f_{деф.} + f_{адг.}$$

$$f_{деф.} = \frac{0,31}{R} \sqrt{\frac{P}{HV}}; \text{ или } f = 0,55 \sqrt{\frac{h}{R}},$$

где h и R – соответственно глубина внедрения инструмента и радиус его рабочей части.

Адгезионную составляющую $f_{адг.}$ теоретически рассчитать трудно, поэтому ее обычно определяют экспериментально, $f_{адг.} = 0,03-0,05$.

Общие коэффициент f трения при выглаживании:

$$f = \frac{P_z}{P_y}; f = 0,03 - 1,12.$$

Инструменты для выглаживания

Для изготовления выглаживателей используют природные и синтетические алмазы.

Стойкость природных и искусственных алмазов примерно одинакова.

Инструмент со *сферической* (а) формой заточки позволяет обрабатывать наружные, внутренние и плоские поверхности как методом выглаживания, так и вибровыглаживанием.

Цилиндрическую форму (б) применяют только для обработки наружных цилиндрических поверхностей.

Тороидальная форма (в) широкого применения не нашла из-за отсутствия природных и синтетических алмазов большого размера.

Конический выглаживатель (г) работает большой поверхностью конуса.

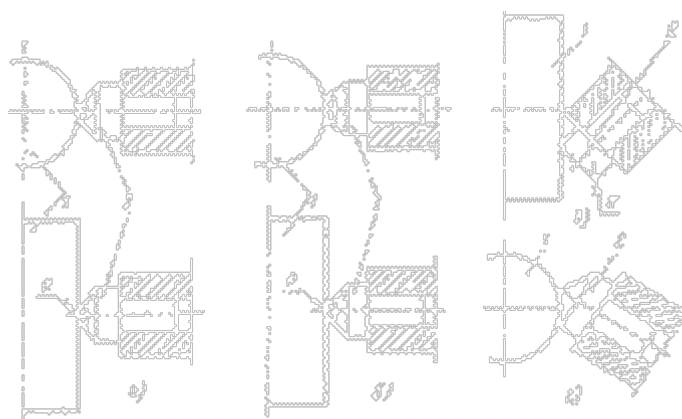


Рис. 7.3. Схема установок выглаживателей при обработке цилиндрической поверхности

Применение. Алмазным выглаживателем можно обрабатывать почти все применяющиеся в промышленности металлы и сплавы, за исключением титана, циркония и ниобия, так как они налипают на рабочую часть выглаживателя.

Детали: все виды поверхностей (наружные, внутренние, плоские, профильные) валов, штоков, цилиндров, поршневых пальцев и т.д.

Нельзя использовать для деталей, имеющих неравномерную твердость.

Вибровыглаживание

При вибрационном выглаживании инструменту в виде сферы (другие формы заточки неприменимы) дополнительно придается возвратно-поступательное перемещение по поверхности детали (рис. 7.4).

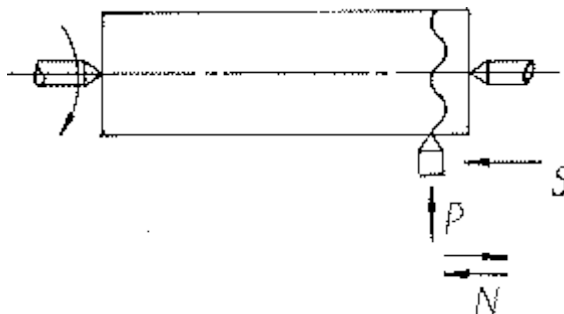


Рис. 7.4. Схема вибровыглаживания

В результате на поверхности образуется синусоидальный канал. При обработке инструмент скользит либо по исходной, либо по частично выглаженной поверхности, а при каждом двойном ходе изменяется направление движения инструмента и дуга контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью.

Микрорельеф, получаемый при вибровыглаживании, по характеру и плотности синусоидальных каналов подразделяется на 4 вида:

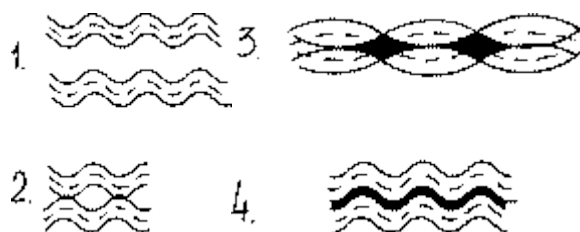


Рис. 7.5. Микрорельеф, получаемый при вибровыглаживании

1- каналы не касаются друг друга; 2 - каналы касаются друг друга; 3 - каналы пересекаются; 4 - каналы накладываются.

Варьирование форм, размеров и расположения микронеровностей по поверхности достигается изменением режимов обработки:

- скорости вращения детали;
- подачи инструмента;
- амплитуды и частоты его колебаний;
- силы поджима инструмента к детали;
- радиуса сферической части инструмента.

В качестве инструмента здесь применяют шарики диаметром 4-10 мм и сферические наконечники из алмазов. В первом случае обработку ведут трением качения, во втором – трением скольжения. В первом случае называется *виброобкатывание*, во втором – *вибровыглаживание*.

Преимущества перед выглаживанием:

- остаточные напряжения больше в 1,3-1,7 раза;
- длина канала увеличивается в 1,5-2 раза;
- повышение износостойкости детали в 1,5 раза;
- возможность изготовления любого микрорельефа для контактирующих тел;
- возможность удержания масляной пленки в каналах при трении.

ЛЕКЦИЯ 8

Глубина деформационного упрочнения поверхностного слоя

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ В ТОЧКЕ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ

Напряженное состояние в данной точке сплошной среды характеризуется симметричным тензором напряжений:

$$T_{\sigma} = \begin{Bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{Bmatrix}, \quad (8.1)$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – нормальные, а $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$ – касательные [напряжения](#) на площадках, перпендикулярных координатным осям x, y, z .

В каждой точке среды существуют три взаимно перпендикулярные площадки, на которых касательные напряжения равны нулю. Перпендикулярно этим площадкам действуют главные нормальные напряжения $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, которые образуют тензор напряжений, отнесенный к главным осям:

$$T_{\sigma} = \begin{Bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{Bmatrix}.$$

В сечениях, делящих пополам углы между главными плоскостями и проходящих через главные оси, касательные напряжения достигают наибольших значений и называются главными касательными напряжениями:

$$\tau_1 = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2}; \quad \tau_2 = \frac{\sigma_3 - \sigma_1}{2}; \quad \tau_3 = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2};$$

Если $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, то максимальное касательное напряжение $T_{max} = \tau_3$.

Величина

$$\sigma = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (8.2)$$

называется средним напряжением или, приняв с обратным знаком, гидростатическим [давлением](#). Эти величины не зависят от направления системы координат, т.е. являются инвариантами.

Тензор [напряжения](#) можно представить в виде суммы шарового тензора T_{σ}^0 , соответствующего среднему напряжению, и девиатора напряжения D_{σ} , характеризующего касательные напряжения:

$$T_{\sigma} = T_{\sigma}^0 + D_{\sigma},$$

$$T_{\sigma}^0 = \begin{Bmatrix} \sigma & 0 & 0 \\ 0 & \sigma & 0 \\ 0 & 0 & \sigma \end{Bmatrix}, \quad D_{\sigma} = \begin{Bmatrix} \sigma_x - \sigma & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y - \sigma & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z - \sigma \end{Bmatrix}. \quad (8.3)$$

где

Следует заметить, что если $D_{\sigma} = 0$, то пластического течения [металла](#) не происходит.

Инвариантой девиатора напряжений является интенсивность касательных напряжений T :

$$T = \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)}. \quad (8.4)$$

В случае простого сдвига $\sigma_1 = \tau$, $\sigma_2 = 0$, $\sigma_3 = -\tau$ (τ – напряжение сдвига). Следовательно,
 $T = \tau$.

Величину $\sigma_1 = \sqrt{3}T$ называют интенсивностью напряжений.

В случае простого растяжения (сжатия) в направлении оси x $\sigma_x = \sigma_1$; $\sigma_y = \sigma_z = \tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{xz} = 0$. Тогда

$$T = \frac{|\sigma_1|}{\sqrt{3}},$$

$$\text{т.е. } \sigma_1 = \sigma_1 = \sigma_x. \quad (8.5)$$

Интенсивность касательных напряжений и максимальное касательное напряжение незначительно отличаются друг от друга. С наибольшей погрешностью около 7%

$$T = 1,08T_{\max}.$$

Важным понятием является показатель схемы напряженного состояния Π :
 $\Pi = \sigma / T$.

РАСЧЕТ ГЛУБИНЫ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

Упрочненный слой – это слой, параметры состояния которого отличаются от параметров основного материала. Однако граница раздела упрочненного и основного материала сильно размыта из-за того, что контролируемый параметр изменяется вблизи этой границы с весьма малым градиентом. Поэтому толщина упрочненного слоя определяется всегда с погрешностью, величина которой зависит от метода измерения и присущих ему погрешностей. Совершенно ясно, что первые признаки искажения [кристаллической структуры](#) будут обнаружены физическими методами исследования на большей глубине, чем первые признаки увеличения [микротвердости](#) или искажения координатной сетки. В связи с этим понятие толщины упрочненного слоя является достаточно условным, а числовые значения, приведенные в различных источниках, могут отличаться на десятки процентов.

С позиций механики деформирования глубина упрочнения определяется границей очага деформации. Таким образом, для точного прогнозирования глубины упрочнения имеет значение адекватность теоретической модели и связанная с ней конструкция поля напряжений (деформаций). На [рис. 8.1](#) показана упрощенная схема поля напряжений.

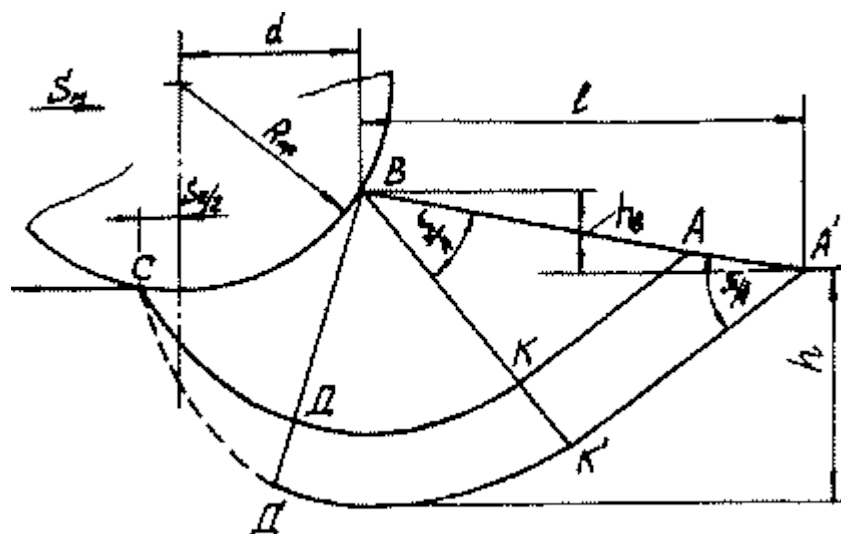


Рис. 8.1. Упрощенная схема поля напряжений

Точка A' , которая легко выявляется профилографированием очага деформации, определяет длину L передней внеконтактной поверхности волны BA' . $A'K'D'C'$ – граница области развитых [пластических деформаций](#), нижняя точка которой определяет толщину упрочняемого слоя h . Поля деформаций,

расположенные ниже этой точки, не вызывают заметного изменения сопротивления [металла](#) пластическим деформациям. Линии BK' и KA' подходят к BA' под углом $\pi/4$. Из геометрических соображений имеем:

$$h = \sqrt{2/2} \sqrt{(h_0^2 + l^2)} - h_0 \quad (8.6)$$

При наиболее часто применяемых режимах обработки $l \gg h_0$.

Тогда

$$h \approx 0,7L \quad (8.7)$$

Исследованиями установлено, что

$$L = 2,1d^{0,5} \quad (8.8)$$

Подставляя (8.7) в (8.8), получим

$$h = 1,5\sqrt{d} \quad (8.9)$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА

Расчет приближенного значения накопленной деформации поверхностного слоя

Величина накопленной [деформации](#) определяется по формуле:

$$\Gamma = \frac{B \cdot d}{R_{np}}$$

где: Γ – значение накопленной деформации [поверхностного слоя](#).

B – коэффициент, равный $4,5 \div 5,4$.

R_{np} – профильный радиус инструмента.

d – параметр, получаемый со при вдавливании инструмента в металл, связан с размером площади контакта инструмента с деталью и силой P_y .

Определение подачи S/z

Подача определяется с учетом следующих соотношений:

$$d + d_1 / S_2 \geq (1,5 + 8).$$

$$d_1 = Ad^B; A=0,39 \text{ при } 0 < d < 4 \text{ мм.}$$

$$A=0,34 \text{ при } 0 < d < 0,6 \text{ мм.}$$

$$B=0,9 \text{ при } 0 < d < 4 \text{ мм.}$$

$$B=1 \text{ при } 0 < d < 0,6 \text{ мм.}$$

Определение диаметра ролика

$$D_p = 40 \dots 100 \text{ мм.}$$

« D_p » должен быть кратным диаметру [детали](#) и по возможности меньшим.

Определение силы обкатывания

$$P_Y = 1,05 \sigma_{\pi} d \sqrt{\frac{2l_{\max} R_p R_d}{R_p + R_d}} \left[1 + 0,35 \sqrt{\frac{R_p + R_d}{R_d}} \right],$$

где: R_p – радиус ролика; R_d – радиус детали.

$$L_{\max} = \sqrt{R_{np}^2 - (d - S_z)^2} - \sqrt{R_{np}^2 - d^2} \quad \text{или} \quad L_{\max} = S_z d / R_{np},$$

где: σ_{π} – [напряжение](#) на площадке контакта, МПа.

$$\sigma_{\pi} = 5,2 \sigma_s / \sqrt{3},$$

σ_s – степень [деформации](#)

$$\varepsilon = \Gamma / \sqrt{3},$$

где Γ – накопленная деформация поверхностного слоя.

СУЩНОСТЬ УПРОЧНЕНИЯ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

Поликристаллические твердые тела состоят из большого числа зерен (кристаллов), разделенных между собой границами. Каждое зерно содержит дефекты. Зерна имеют различную ориентировку ([рис. 8.2](#)).

При приложении внешнего напряжения к металлу пластическая деформация в первую очередь произойдет в зерне, наиболее благоприятно ориентированном к внешнему напряжению (т.е. с наибольшим касательным напряжением). С ростом внешнего напряжения наблюдается постепенное вовлечение остальных зерен в процесс [пластической деформации](#) при сохранении сплошности зерна. На рисунке показана схема передачи пластической деформации от зерна к зерну. Под действием внешнего

сдвигающего напряжения τ_s [дислокации](#), генерируемые активным источником В, приходят к границе зерна и задерживаются около нее. По мере накопления дислокаций у точки «Р» растет напряжение. Однако этого недостаточно, чтобы перейти из одного зерна в другое через границу MN. Поэтому распространение скольжения от одного зерна к другому осуществляется за счет того, что при достижении определенного значения напряжения в точке «Р» возбуждается источник дислокации в соседнем зерне, например в точке А.

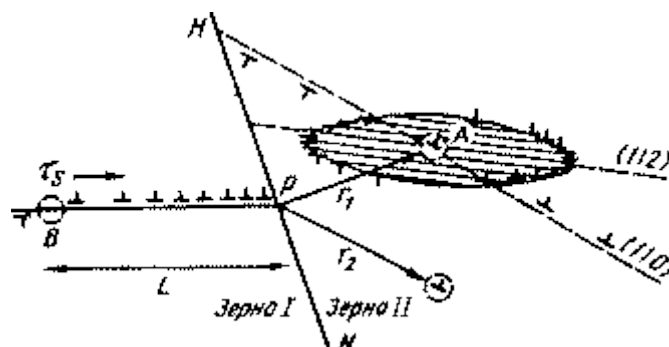


Рис. 8.2. Схема инициирования скольжения (или двойникового) в соседнем зерне поликристалла некоторой точке А, удаленной от вершины плоского нагромождения дислокаций р на расстояние r_1

Движение дислокаций, генерируемых источником А, будет происходить по наиболее благоприятно ориентированной плоскости скольжения.

Рассмотренный механизм торможения дислокаций у границ зерна называется *барьерным упрочнением*.

Упрочнение более интенсивно происходит на границах зерен, мелкое зерно упрочняется интенсивнее крупного.

Напряжение текучести « τ_T » в зерне диаметром « d », в соответствии с соотношениями Холла-Петча, зависит от составляющих:

$$\tau_T = \tau_0 + k\alpha^{0.5},$$

где: (τ_T – напряжение как результат сопротивления движению дислокаций в теле зерна, не зависящего от размера зерна (внутреннее трение);

k – константа, характеризующая трудность эстафетной передачи пластической деформации от зерна к зерну.

Напряжение текучести τ_T (сопротивление деформации) возрастает с уменьшением размера зерна не из-за наличия границы самой по себе, а из-за взаимодействия между зернами, разделенными этой границей.

Если дислокация надежно задерживается границей и возможности эстафетной передачи деформации ограничены, то [деформация](#) локализуется в микрообъемах, а напряжение текучести возрастает.

Существенная локализация деформаций повышает [концентрацию напряжений](#), что приводит к преждевременному разрушению, т.е. снижению [пластичности](#).

Наряду с величиной зерна на деформационное упрочнение [металлов](#) большое влияние оказывает количество и размер внутризеренных блоков (ячеек). С повышением степени деформации и роста [плотности дислокаций](#) происходит дробление зерна на блоки по плоскостям скопления дислокаций.

Наряду с дроблением зерна на блоки происходит разориентация блоков по границам на некоторый угол θ . При $\theta = (2,5-5)^\circ$ граница блоков оказывает сопротивление движению дислокаций. Если θ превышает $(2-5)^\circ$, то границы блоков становятся местом скопления дислокаций, повышающим деформирующее напряжение.

ЛЕКЦИЯ 9

Методы лазерного, электронно-лучевого, плазменного и детонационного упрочнения деталей машин

Существует три группы методов упрочнения поверхностей деталей машин концентрированными потоками энергии:

- лазерная и электронно-лучевая обработка;
- плазменное и детонационное напыление;
- вакуумная ионно-плазменная обработка.

К первой группе относятся методы, основой которых является перенос энергии от лучевого источника к обрабатываемой поверхности, которая в результате мощного локального энергетического воздействия приобретает новые свойства.

Ко второй группе относятся методы, основу которых составляет перенос вещества от некоторого источника к предварительно очищенной обрабатываемой поверхности, на которой это вещество оседает, формируя защитное покрытие.

В третьей группе используется источник вещества, крупные частицы которого разогреваются и разгоняются до высокой энергии и внедряются или прилипают к обрабатываемой поверхности, формируя на ней слой нанесенного вещества.

Лазерное упрочнение

Основой процесса лазерного упрочнения является быстрый нагрев до высокой температуры (температуры плавления) поверхностного слоя металла с последующим быстрым охлаждением путем отвода тепла в основной объем металла, который остается практически холодным.

В принципе, необходимое повышение температуры металла можно получить и стандартными методами – нагревом в термической или индукционной печи. Однако эти методы часто являются непригодными из-за неоднородности нагрева. Кроме того, в крупногабаритных деталях очень часто необходимо закалить только часть поверхности, а не весь объем детали. Сделать это можно только лазерной обработкой (термообработкой), которая может проводиться с оплавлением и без оплавления поверхностного слоя. Чаще всего используют обработку без оплавления с сохранением исходной шероховатости $R_a=0,16-1,25\text{мкм}$. Глубина упрочняемого слоя металла определяется величиной допустимого линейного износа.

Производительность лазерного упрочнения определяется:

$$G_{\text{лаз.терм.}} = K_{\text{л}} V d_0$$

где: K – коэффициент перекрытия;

V – скорость движения луча (детали);

d_0 – диаметр пучка (ширина дорожки упрочнения), $d_0 = 1-1,5$ мм.

Возможна обработка *перекрывающимися* и *неперекрывающимися* дорожками. При наложении дорожки упрочнения происходит частичный нагрев предыдущей упрочненной зоны, что может привести к отпуску и снижению твердости. При обработке неперекрывающимися дорожками зазор между ними составляет 10-30% от площади обрабатываемой поверхности.

Уменьшение износа в 2-3 раза.

Применение: коленчатые валы двигателей, гильзы цилиндров, зубчатые колеса, детали химического, нефтяного и бурового оборудования.

Лазерная наплавка

Лазерная наплавка порошковых материалов обеспечивает получение наплавленного слоя высокой степени однородности и качества без значительно термического влияния на нижележащие слои металла.

Применяют порошки хрома, бора, никеля, кремния.

Сущность процесса наплавки заключается в нанесении на поверхность детали слоя порошка и последующего его расплавления лучом лазера. Порошок диффундирует в основной металл, а быстрое остывание позволяет получить однородную структуру поверхностного слоя. После последующей шлифовки толщина наплавки может достигать 0,2-0,4 мм, повышение износостойкости увеличивается в 2-3 раза.

Лазерная установка, предназначена для поверхностного упрочнения металла, содержит в качестве основных элементов лазер с блоком питания, оптическую систему для транспортировки и фокусирования лазерного луча, систему позиционирования обрабатываемой детали, систему управления и контроля параметров обработки.

Лазеры могут быть электроразрядные CO_2 -лазеры и твердотельные Nd-лазеры.

Электроразрядные CO_2 -лазеры имеют большую длину волны (10,6 мкм.), электроразрядные возбуждения, прокачку газовой смеси (CO_2 , N_2 , He) по замкнутому контуру. Используются для непрерывной обработки. Мощность – 1-25 кВт. Твердотельные Nd-лазеры работают от активного элемента в виде стержня или пластины. Могут работать в прерывистом и непрерывном режимах. Мощность – до 200 Вт. Созданы до 3 кВт. Длина волны менее 10,6 мкм и, следовательно, более высокое поглощение в металле. Можно использовать транспортировку луча по световодам. Применение предпочтительное.

Электронно-лучевая обработка

Здесь обработка поверхности производится мощным электронным пучком в вакуумной среде. При этом необходима защита оператора от рентгеновского излучения, что препятствует широкому массовому распространению такого [упрочнения](#).

Преимущества по сравнению с лазерной:

- более высокий КПД;
- более высокая мощность;
- меньшая стоимость.

Применяют наплавку с порошком алюминия, железа и никеля в среде азота. Износ уменьшается в 2-4 раза.

Применение: такое же, как и лазерной обработки.

Установка содержит: электронную пушку с блок питания, герметичную вакуумную камеру с устройствами перемещения обрабатываемой детали или пушки, вакуумную систему с насосами, систему управления и контроля.

Мощность – до 20 кВт.

Методы детонационного и плазменного нанесения покрытий

Эти методы относятся к газотермическим методам, действие которых основано на полном или частичном нагреве материала покрытия до состояния плавления и распылении его газовой струей. Напыляемый материал может быть в виде проволоки или порошка. Нагрев напыляемого материала может производиться от газового пламени, плазмы электрической дуги или от детонации взрывчатой газовой смеси.

В *детонационном методе* используется [энергия](#) кислородно-ацетиленовых взрывов, которая обеспечивает необходимый разогрев и ускорение напыляемого материала, а при плазменном – энергия плазменной струи. Распыляемые частицы материала ударяются в подложку и расплющиваются, образуя тонкие чешуйки, закрепляющиеся на [поверхностном шероховатом слое](#) путем механического и физико-механического взаимодействия с материалом основы. В результате взаимодействия отдельных чешуек образуется своеобразная структура напыляемого покрытия. Чем больше скорость соударения частиц, тем выше прочность наносимого покрытия. При детонационном напылении скорость движения напыляемого порошка составляет 600-1000 м/с., что в 4-7 раз больше, чем при плазменном и газоплазменном методах напыления.

Особенность этих методов упрочнения – возможность наносить тугоплавкие материалы на металлическую подложку без значительного ее нагрева (не более 150°C), т.е. наносить покрытия на окончательно термообработанные и упрочненные стали, алюминиевые, титановые и другие сплавы после финишной механической обработки, не опасаясь изменения свойств структуры поверхностного слоя.

Процесс плазменного напыления происходит в два этапа:

1 – полет и распыление частиц напыляемого материала; 2 – удар об обрабатываемую поверхность, соединение частиц с ней и между собой. Образование покрытия происходит вследствие соударения частиц с поверхностью обрабатываемой детали, их сильного деформирования, расплющивания и разбрызгивания. В результате получается покрытие, так же как и в случае детонационного напыления, состоит как бы из чешуек напыляемого материала, соединенных между собой по контактной поверхности участками сваривания, поэтому прочность и плотность покрытия ниже прочности и плотности исходного материала.

При детонационном напылении кинетика и механизм формирования покрытий определяются [пластичной деформацией](#) частиц порошка и подложки в зоне соударения, где происходит локальное повышение активности твердой подложки под действием давления от удара твердых частиц, вызывающего упругие искажения решетки и пластическую деформацию.

Это приводит к увеличению прочности сцепления покрытия с основным металлом.

Для повышения физико-механических свойств напыленного слоя и улучшения [адгезии](#) к подложке применяют дополнительную операцию оплавления: напыленный слой нагревают до температуры, близкой к его плавлению. В результате нагрева между напыленным слоем и основным металлом протекает диффузионный процесс, и при остывании образуется плотное покрытие. Поры, остающиеся после

напыления, заполняются расплавленной частью напыленного материала. После остывания получается равномерный тонкий без пор однородный слой. При этом охлаждение ведут вместе с печью.

Способы оплавления:

- плазменной или газовой горелкой;
- в электрической печи;
- в соляной ванне;
- ТВЧ.

Методом детонаций напыляют пластичные металлы и сплавы (Cu, Ni, Fe и др.), твердые непластические металлы и тугоплавкие соединения (W, Al_2O_3 и др.)

Применение: моторостроение; авиационное, станко- и приборостроение; химическое и металлургическое машиностроение; инструментальное производство; ракетная, космическая и ядерная техника.

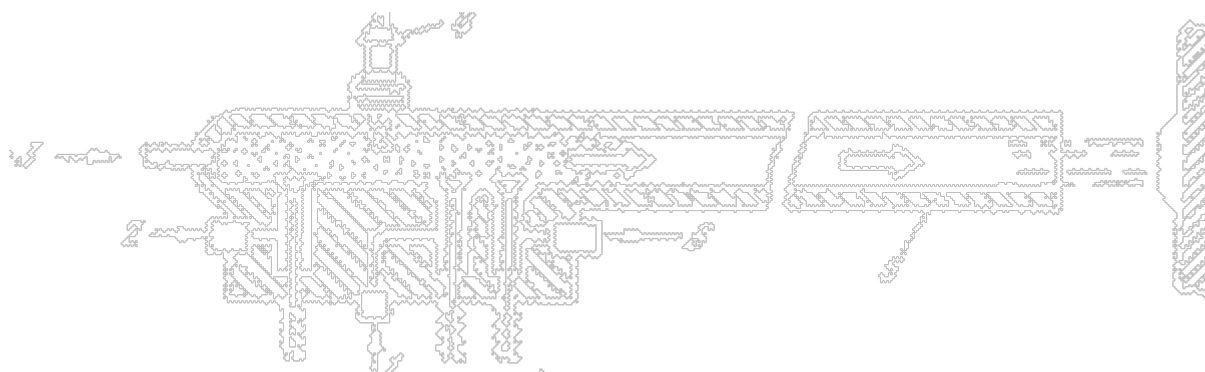


Рис. 9.1. Схема детонационной установки с внутренним смесеобразованием

1 – ацетилен; 2 – азот; 3 – подача порошка; 4 – свеча зажигания; 5 – выходная труба; 6 – кислород.

Разработаны конструкции детонационных установок с внутренним и внешним смесеобразованием. В первом случае роль камеры для образования горючей смеси выполняет ствол; во втором – в ствол подается горючая смесь, подготовленная в смесителе.

Детонационная установка с внутренними смесеобразователями представляет собой водоохлаждаемый ствол длиной 1-1,8 м с внутренним диаметром от 10 до 40 мм. В ствол подается смесь кислорода и ацетилена вместе с порцией порошка. Взрываема газова смесь воспламеняется при помощи электрического импульса, и детонационная волна перемещается по стволу, ускоряя и нагревая порошок. Частицы порошка ускоряются до скорости 500-1000 м/с и ударяются в [деталь](#), образуя пятно диаметром, зависящим от диаметра ствола. Затем ствол очищается азотом и процесс повторяется. Частота повторений – 4-8 циклов/сек.

Плазменное поверхностное упрочнение деталей

Одной из наиболее перспективных обработок является плазменная технология, интенсивно разрабатываемая как в нашей стране, так и за рубежом. Использование низкотемпературной плазмы эффективно не только для переплава металлов и сплавов, напыления износостойких, жаропрочных и коррозионностойких покрытий, резки и сварки различных материалов, но и для поверхностного упрочнения различных изделий.

Плазменное поверхностное упрочнение находит широкое применение как в условиях мелкосерийного и единичного (в том числе ремонтного), так и крупносерийного и массового производства. Сущность его заключается в термических фазовых и структурных превращениях, происходящих при быстром концентрированном нагреве рабочей поверхности детали плазменной струей (дугой) и теплоотводе в материал детали.

При [плазменном напылении](#) в качестве плазмообразующих газов используют аргон, неон, азот, водород, гелий, аммиак, природный газ и их смеси. Порошок вводится в плазменную струю.

Для осуществления различных видов плазменной обработки материалов (резки, сварки, напыления, поверхностного упрочнения, легирования) используются установки, которые включают источник питания с аппаратурой управления, механизмы, обеспечивающие равномерное перемещение плазматрона над обрабатываемой поверхностью, и плазматрон.

Установка для микроплазменной обработки МПУ-4 обеспечивает надежную работу в четырех режимах горения дуги:

- А – непрерывный режим тока дуги прямой полярности;
- В – импульсный режим тока дуги прямой направленности;
- С – импульсный режим тока прямой и обратной направленности;
- Д – непрерывный режим тока дуги обратной полярности.

Техническая характеристика установки МПУ-4:

Напряжение питающей сети, В	220-380
Количество фаз	3
Частота питающей сети, Гц	50
Диапазон токов дуги, А:	
прямой полярности	3-30
обратной полярности	1,5-15
Напряжение холостого хода, В	60-80
Длительность импульса тока прямой и обратной полярности, а также длительность паузы, С	0,02-0,5
Ток дежурной дуги, А	3-6
Напряжение холостого хода дежурной дуги, В	80 10%
Длина дуги, мм	3-6
Расход плазмообразующего газа, л/мин	0,2-0,5
Потребляемая мощность, кВА	3,5
Масса, кг	100

Для генерирования плазменного источника нагрева широко используются [плазматроны](#) с открытой дугой ([рис. 9.2 а](#)) или прямого действия (положительный заряд подается на упрочняемую деталь) и плазматроны с замкнутой дугой-струей ([рис. 9.2 б](#)) или косвенного действия (отрицательный и положительный заряды подаются на детали плазматрона – соответственно катод и анод).

Плазматрон является основным элементом энергетической части установок для плазменного упрочнения деталей и представляет собой устройство, генерирующее стабилизированный в пространстве поток дуговой плазмы с температурой до нескольких тысяч градусов.

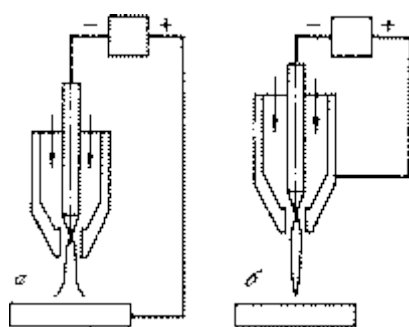


Рис. 9.2. Схемы плазматронов

К плазматронам предъявляются следующие требования:

- – мощность;
- – высокая энергетическая эффективность;
- – стабильность параметров плазменного потока;
- – большая длительность непрерывной работы;
- – надежность конструкции;
- – простота обслуживания;
- – возможность использования различных плазмообразующих газов.

Мощность плазматрона зависит от вида электроплазменного процесса может меняться от единицы киловатт до нескольких сотен мегаватт. Для напыления и плазменного упрочнения используются дуговые плазматроны мощностью до 100 кВт.

Под высокой энергетической эффективностью плазматронов понимается возможность эффективного преобразования электрической энергии в тепловую и получение максимального КПД [технологического процесса](#).

Эффективность ведения технологического процесса зависит от стабильности параметров плазменного потока. В начале работы плазматрона могут создаваться значительные пульсации параметров плазменного потока, что приводит к неравномерному вводу тепла в упрочненное изделие и, как следствие, неравномерному распределению [твердости](#) по длине и ширине упрочненной зоны.

Дуговые плазматроны, предназначенные для плазменного поверхностного упрочнения, могут работать 200 часов и более без смены электродов.

Надежность конструкции плазматрона определяется многими факторами: простотой его конструкции, надежностью сборки и разборки, удобством монтажа и т.д.

Под простотой оборудования следует понимать простоту крепления плазматрона в технологической зоне, сборки и разборки, точность возбуждения электрического разряда без ввода дополнительных устройств в область разрядного канала.

Возможность использования разнообразных плазмообразующих средств в дуговых плазматронах ограничивается процессом эрозии электродов.

Плазматроны классифицируются по ряду признаков.

По назначению плазматроны для поверхностного упрочнения подразделяют на машинные и ручные.

По принципу работы плазматроны могут быть с внешней или вынесенной дугой (плазматроны прямого действия) и с внутренней дугой (плазматроны поверхностного действия). Наиболее широкое применение для упрочнения деталей сложной формы получили плазматроны косвенного действия.

По роду используемого тока различают плазматроны постоянного тока и плазматроны переменного тока. Наибольшее распространение получили плазматроны постоянного тока, так как, более просты они по своим конструктивным схемам и обладают высокой эффективностью преобразования электрической [энергии](#) в тепловую.

По роду применяемой рабочей среды можно выделить три типа плазматронов: с нейтральным рабочим газом, с окислительной средой и водой. Из газов, нейтральных по отношению к рабочим электродам, наибольшее применение получили аргон, азот, водород и их смеси. С точки зрения экономичности процесса целесообразно использовать плазматроны, работающие на воздухе, однако стойкость электродов у таких плазматронов относительно невелика из-за значительной их эрозии.

При всем разнообразии конструкций все плазматроны имеют три основных элемента: электрод (катод), сопло (у плазматронов косвенного действия – анод) и изолятор (промежуточная вставка). Изолятор разделяет электрод и сопло, находящиеся под разными электрическими потенциалами.

Электроды плазматрона по типу и по конструкции зависят от состава плазмообразующей среды. В качестве материала для электродов, работающих в окислительных средах, используют графит, в нейтральных газах – вольфрам. Конструктивно электроды выполняют двумя способами: в виде прутка, который фиксируется цанговым зажимом, закрепленным в электродном узле плазматрона, и медной державки с запрессованным в нее стрежнем электрода.

Сопло плазматрона предназначено для формирования геометрических и энергетических параметров дуги. Основные параметры сопла – диаметр и высота канала. Для [упрочнения](#) деталей желательно уменьшать диаметр сопла и увеличивать высоту канала сопла, что благоприятно сказывается на технологических возможностях плазматрона, так как при этом увеличивается скорость упрочнения и глубина упрочненной зоны. Однако значительное уменьшение диаметра сопла приводит к снижению его стойкости и возникают трудности с зажиганием дуги.

К материалу промежуточных вставок предъявляют следующие требования:

- должен обладать высокой электрической [прочностью](#), так как возбуждение дуги осуществляется чаще всего с помощью высоковольтного высокочастотного разряда;
- иметь высокую механическую прочность, поскольку промежуточные вставки выполняют функции несущих частей конструкции, на которой крепятся остальные узлы плазматрона;
- возможность обработки режущим инструментом;
- термостойкость, так как подвержен воздействию теплового и светового излучения дуги;

- герметичность, поскольку через него проходят коммуникации плазмообразующего газа и охлаждения.

Имеются следующие варианты плазменного поверхностного упрочнения:

- упрочнение без оплавления поверхности детали;
- упрочнение с оплавлением поверхности детали;
- упрочнение с зазором между упрочненными зернами;
- упрочнение с перекрытием упрочненных зон;
- химико-термическая плазменная обработка;
- плазменное упрочнение в сочетании с другими способами объемной или поверхностной термической обработки.

Плазменное упрочнение без оплавления поверхности является наиболее распространенным для стальных деталей, так как обеспечивает сохранение качества (величины шероховатости), достигнутого предшествующей механической обработкой.

Упрочнение с оплавлением поверхности стальных и чугунных деталей применяется, когда необходимо получить особые эксплуатационные свойства. Например, обработка валков черновой группы клеток станов горячей прокатки, к шероховатости рабочей поверхности которых не предъявляются высокие требования. При обработке чугунных деталей на поверхности образуется отдельный слой с высокой [износостойкостью](#).

Плазменное упрочнение поверхностей деталей без перекрытия зоны обработки приводит к получению равномерной [твердости](#) на поверхности, а с перекрытием зон обработки – к появлению неравномерной твердости из-за появления зон отпуска в местах перекрытия.

Возможность реализации химико-термической обработки при плазменной обработке определяется родом газа, используемого в качестве плазмообразующего, например азотирование. Здесь в качестве плазмообразующего газа применяется смесь аргона с азотом.

Возможно применение [технологии](#) комплексного упрочнения, включающей предварительную или последующую обработку, объемную термическую обработку и плазменное упрочнение; закалку в ТВЧ и плазменную обработку.

ЛЕКЦИЯ 10

Характеристики рабочих поверхностей деталей, обеспечивающие точность в нанометрическом диапазоне

Механика обработки материалов резанием, которым присуща структурная неоднородность, недостаточно изучена. В отличие от большинства [металлов](#), здесь процесс резания, как правило, проходит без образования стружки. Он, скорее, напоминает процесс поверхностного разрушения, который изучен в гораздо меньшей степени, чем стружкообразование. Поэтому представляет научный и практический интерес исследование механики процесса разрушения такого материала в зоне контакта с режущим лезвием. Знание параметров этого процесса может помочь правильно выбирать режимы резания, обеспечивающие необходимые технические требования, в частности, точность формы и шероховатость обрабатываемой поверхности, а также рассчитывать силы и мощность резания, прогнозировать стойкость режущего [инструмента](#).

Одной из важнейших характеристик, определяющих качество обработки, является [трение](#). В зависимости от масштаба, на котором изучается трение, в современной трибологии принято выделять три раздела:

- [макротрибологию](#) (или просто трибологию);
- [микротрибологию](#);
- [нанотрибологию](#).

Лишь с возникновением сканирующих микроскопов появилась возможность экспериментального изучения микро- и нанотрибологии. Ниже кратко обсуждаются некоторые положения трибологии, а затем рассказывается о методе исследования латеральных сил.

Сила трения – это совокупный эффект, возникающий в результате самых различных физических явлений: упругости, адгезии, вязкости, капиллярных сил, химических особенностей, фононного и электростатического взаимодействий и проч. В зависимости от условий может преобладать то или другое явление.

Каждый из разделов трибологии исследует трение на своем масштабе. Макротрибология имеет дело с большими объектами и не рассматривает особенностей строения вещества. С другой стороны, задачей нанотрибологии является объяснение трения на уровне взаимодействия отдельных атомов. Микротрибология является переходным разделом.

Основным соотношением *макротрибологии* является *закон Амонтона-Кулона*, который пропорционально связывает силу трения и нормальную реакцию:

$$F_{\text{тр}} = kN, \quad (10.1)$$

где k – безразмерный [коэффициент трения](#), который и несет всю информацию о трибологии. Он зависит от многих факторов, среди которых температура, влажность, скорость скольжения и др.

В макротрибологии считается, что геометрическая площадь контакта двух тел равна (или не сильно отличается) реальной площади контакта на атомарном уровне. Разумеется, это некоторое приближение, т.к. на самом деле даже самые гладкие поверхности на меньшем масштабе оказываются неровными и фактический контакт двух тел происходит по гораздо меньшей площади – соприкасаются только выступающие части. Контакт в макромасштабе – это множество микроконтактов ([рис. 10.1](#)). Макроскопическая сила трения при этом есть усредненная микроскопическая сила трения отдельных микроконтактов, которая может сильно варьироваться.



Рис. 10.1. Контакт в макромасштабе шарика и кремниевой пластины

Микротрибология занимается исследованием таких элементарных контактов. Как правило, подразумевается, что небольшой выступ взаимодействует с некоторой поверхностью. Именно такая модель и сделала АСМ наиболее привлекательной экспериментальной методикой микротрибологии.

Как известно, [трение](#) является диссипативной силой. При скольжении поверхностей друг по другу происходит рассеяние механической энергии. И, например, для поддержания постоянной [скорости](#) скольжения внешней силе необходимо совершать работу. Поэтому каждый из эффектов, приводящих к трению, имеет механизм диссипации [энергии](#). В рамках обсуждения микротрибологии перечислим некоторые из них.

Трение подразделяется на два основных типа: сухое и жидкое. Причем жидким трение считают даже тогда, когда на поверхности образуется очень небольшая (в несколько атомарных слоев) пленка жидкости. В результате адсорбции это происходит практически всегда, исключения составляют следующие случаи:

1. гидрофобные поверхности зонда и образца,
2. трение в вакууме,
3. а также случаи, когда в результате большой нормальной нагрузки слой жидкости вытесняется из площади контакта, поверхности вступают в непосредственный контакт и фактически реализуется механизм сухого [трения](#).

В случае сухого трения считается, что при скольжении трущихся поверхностей микронеровности задевают друг за друга. При преодолении препятствий возникают атомарные вибрации, которые в виде фононов рассеиваются, унося [энергию](#). Кроме того, при разрыве [адгезионных](#) связей, возникающих между выступами соприкасающихся поверхностей, в металлических образцах образуются пары электрон-дырка, на возникновение которых также затрачивается энергия (этот эффект значительно слабее, чем фононное рассеяние). В случае мягких образцов возможно и разрушение микронеровностей, так называемое "пропахивание", в этом случае механическая энергия расходуется на разрушение атомарных связей.

Жидкое трение существенно зависит от толщины слоя жидкости. При пленке в один мономолекулярный слой трение мало отличается от сухого. Если монослоев два-три, то рассеяние энергии в фононном канале уже блокировано, и основную роль играет вязкость жидкого слоя. Для более толстых пленок начинают преобладать капиллярные эффекты, в результате которых неровности соприкасающихся поверхностей притягиваются друг к другу, если их попытаться сдвинуть.

Какова зависимость силы трения от нормальной приложенной нагрузки в микротрибологии? Аналогом закона Амонтона-Кулона здесь является *формула (модель) Баудена-Табора*, которая записывается так:

$$F_{\text{тр}} = \tau A_c, \quad (10.2)$$

где τ – касательное [напряжение](#), A_c – реальная площадь элементарного контакта (в отличие от геометрического контакта в макротрибологии). Эта площадь зависит от степени взаимного проминания контактирующих выступов обеих поверхностей. Как известно, площадь такого контакта дает решение задачи Герца. В результате:

$$F_{\text{тр}} = \tau \pi \left(\frac{RN}{K} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (10.3)$$

где R – радиус закругления зонда, N – нормальная сила, K – эффективный модуль Юнга.

$$\frac{1}{K} = \frac{3}{4} \left(\frac{1-\mu'^2}{E'} + \frac{1-\mu^2}{E} \right) \quad (10.4)$$

здесь E, E' – модули Юнга, а μ, μ' – коэффициенты Пуассона зонда и образца соответственно. Для кремниевых зонда и образца $E = E' = 150 \text{ ГПа}$, $\mu = \mu' \approx 0.3$, $K = 110 \text{ ГПа}$.

Видно, что зависимость силы [трения](#) от нормальной нагрузки N носит нелинейный характер. В случае наличия жидкой пленки к N необходимо прибавить [адгезионный](#) член, связанный с наличием [капиллярной силы](#). Воспользуемся моделью DMT:

$$F_c = 4\pi\gamma R \quad (10.5)$$

где γ – коэффициент поверхностного натяжения. Эта сила дополнительно прижимает друг к другу соприкасающиеся поверхности.

Модель Баудена-Табора хорошо подтверждается на опыте. На рисунке 10.2 приведены экспериментальные данные в вакууме (жидкая пленка и капиллярный эффект отсутствуют), на воздухе и изображена для сравнения теоретическая кривая (3).

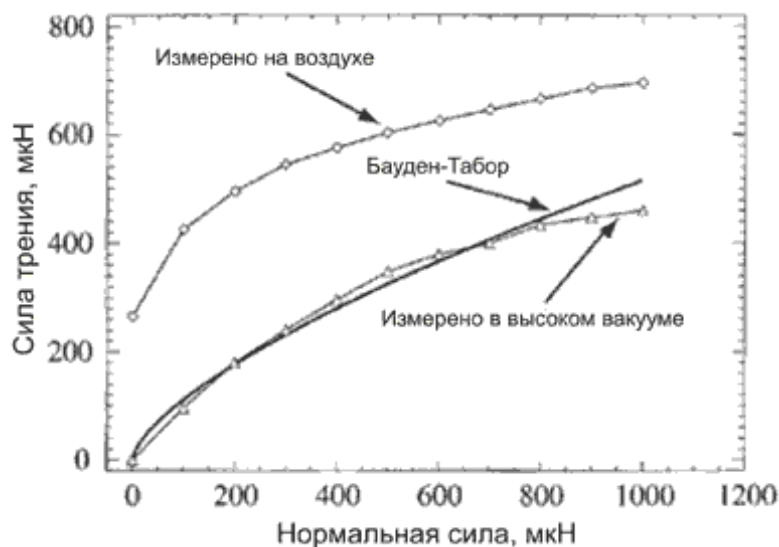


Рис. 10.2. Зависимость силы трения от нормальной силы на воздухе и в вакууме. Жирной линией изображена теоретическая зависимость по Баудену-Табору

В микротрибологии часто встречается так называемый *эффект прилипания-скольжения*. Сила трения при движении поверхности относительно другой силы трения имеет пилообразный профиль (рис. 10.3), она неравномерна. Прилипнув к одной "точке" на соседней поверхности, выступу в результате адгезии, капиллярных сил и т.п., сложно оторваться от нее, для это требуется преобладающая сила. Оторвавшись, выступ перескакивает к другой такой точке, возле которой снова прилипает на некоторое время, и т.д.

Эффект прилипания-скольжения существенно зависит от скорости сканирования (рис. 10.4). Для исследования зависимости силы трения от скорости скольжения был проведен эксперимент, в котором измерялась сила трения между кремниевым шариком радиусом 0,5 мм и плоской кремниевой поверхностью с шероховатостями 0,2 нм для шарика и 0,17 нм для пластины. При этом оба твердых тела были гидрофильны. При низкой скорости эффект прилипания-скольжения выражен более ярко, частота скачков меньше, а их амплитуда больше. С ростом скорости частота повышается, а амплитуда, наоборот, понижается. Существует некоторая максимальная критическая скорость скольжения, после которой эффект пропадает и сила трения становится регулярной. В эксперименте критическая скорость 0,4 мкм/с достигалась при нормальной силе придавливания, равной 70 мкН.

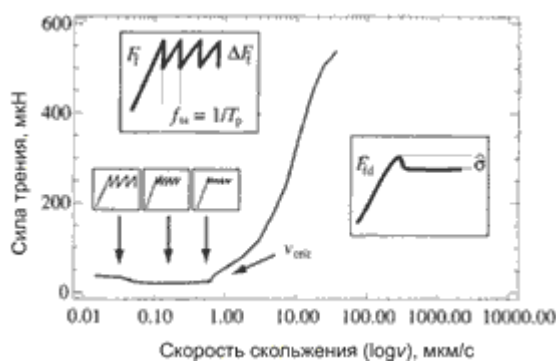


Рис. 10.3. Зависимость силы трения от скорости скольжения. В квадратах изображено поведение силы трения при скоростях скольжения, больших и меньших критической

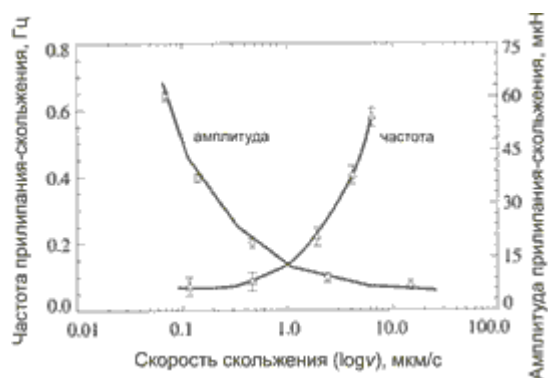


Рис. 10.4. Зависимость амплитуды и частоты силы трения в эффекте прилипания-скольжения от скорости сканирования

На тех же образцах была изучена зависимость силы трения от температуры и влажности. Сначала оба твердых тела были гидрофильны. Затем, чтобы убрать оксидную пленку и сделать их гидрофобными, в течении двух минут их травили в плавиковой кислоте HF.

Таким образом, сила трения измерялась как функция относительной влажности при различных температурах для гидрофильных и гидрофобных образцов. Температура была изменяемым параметром. Измерительную систему помещали в камеру с регулируемой влажностью и температурой. Влажность изменяли от 85% до 20%. Нормальная сила поддерживалась постоянной и была равна $N = 2000$ мкН. На рисунке 10.5 приведены экспериментальные результаты для высоких и низких температур.

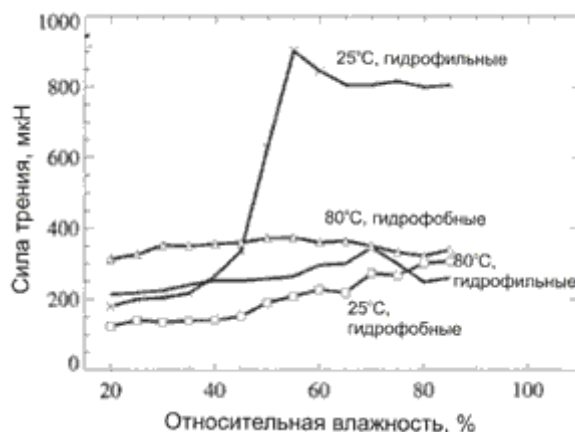


Рис. 10.5. Зависимость силы трения от влажности при разных температурах для гидрофильных и гидрофобных систем

На поверхности гидрофильного образца может адсорбироваться большое количество воды. Таким образом, чем больше влажность окружающей среды, тем больше жидкости может адсорбироваться и тем больше сила трения. При росте температуры десорбция начинает превышать адсорбцию, и трение уменьшается. Чем выше температура, тем более энергетичны молекулы воды и тем легче они покидают поверхность и возвращаются к ней. Поэтому зависимость трения от влажности слабая.

Гидрофобный кремний, в отличие от гидрофильного, показывает слабую зависимость трения от влажности при любых температурах. При росте температуры трение слабо возрастает. Это означает, что в результате десорбции твердые поверхности приходят в более тесный контакт, и между ними начинают действовать силы Ван-дер-Ваальса и возникают химические связи.

Нанотрибология имеет дело с взаимодействием отдельных атомов. Представим, что поверхностный атом одной поверхности движется при скольжении в периодическом потенциале поверхностных атомов другой (рис. 10.6), отсутствует механизм диссипации энергии.

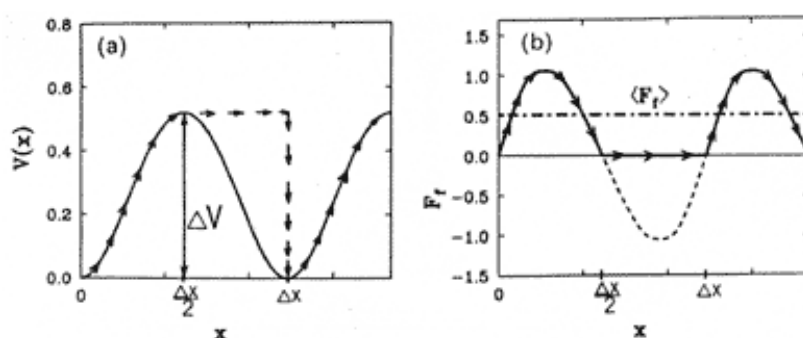


Рис. 10.6. Слева: потенциальная энергия и траектория зонда; справа: мгновенная и средняя сила трения

Неконсервативность вводится следующим образом. Достигнув верхней точки потенциала, атом, который можно смоделировать подвешенным на пружинке, отрывается от контактируемой поверхности и "падает" в точку минимума потенциала (или ее окрестность). Атом переходит в точку с другой энергией, то есть потенциал становится "непотенциальным". Мгновенная сила трения при этом:

$$F_{\text{тр}}(x) = \frac{\partial V(x)}{\partial x}, \text{ если } 0 < x < \frac{\Delta x}{2}$$

$$F_{\text{тр}}(x) = 0, \text{ если } \frac{\Delta x}{2} < x < \Delta x$$
(10.6)

Можно считать, что энергия, благодаря упругому подвесу атома, передается вглубь тела, то есть, с наноскопической точки зрения, диссипируется. Такая модель приводит к неконсервативной (в среднем) силе, показанной на рисунке 10.6, которая и является силой трения. Эта средняя неконсервативная сила является силой трения в микротрибологии.

Система станок-инструмент-деталь (СИД)

– техническая система, обеспечивающая функционирование процесса обработки и получение детали с требуемыми параметрами. Закономерности обработки металлов резанием рассматриваются как результат взаимодействия элементов системы станок— инструмент — деталь (СИД).

ЛЕКЦИЯ 11

Факторы, препятствующие достижению высокоточных поверхностей: вибрации упругих систем станков и режущих инструментов

Одним из основных механизмов влияния динамических характеристик системы [СИД \(станок–инструмент–деталь\)](#) на качество поверхности являются [автоколебания](#), природа которых определяется взаимодействием процесса стружкообразования с системой СИД. Многие исследователи однозначно считают, что снижение всех видов колебаний, сопровождающих резание, позволяет повысить качество выходных характеристик обрабатываемых изделий. Однако, в зависимости от частоты, существуют оптимальные амплитуды автоколебаний, работа с которыми позволяет значительно увеличивать стойкость инструмента, производительность металлообработки и эксплуатационные характеристики обработанных [деталей](#). Одним из подтверждений существования условий положительного влияния вибраций, задаваемых с определенной частотой, амплитудой и направленностью, является опыт применения обработки различными видами [инструментов](#) с наложением вынужденных колебаний.

Причинами возникновения интенсивных автоколебаний при резании металлов могут быть различные физические явления, порой действующие одновременно. Здесь обычно упоминаются падающая зависимость силы резания от [скорости](#) резания и фазовое отставание изменения силы резания от изменения толщины среза. Однако автоколебания возникают и на скоростях, где отсутствует падающая зависимость силы от скорости, и при выстое (остановке подачи) инструмента, где отсутствуют изменения толщины среза. Рассмотрим универсальный механизм возникновения автоколебаний, основанный на присутствии координатной связи и дискретности процесса стружкообразования. Можно предположить, что это наиболее универсальный механизм возникновения интенсивных высокочастотных автоколебаний, которые сопровождаются свистом с высоким уровнем звукового давления, и малозаметных автоколебаний, обязательно присутствующих при резании материалов с поликристаллической [структурой](#).

Координатная связь проявляется в том, что в общем случае под действием приложенной силы вершина резца стремится сместиться не только в направлении вектора силы, но и в ортогональном направлении. Это происходит из-за того, что жесткость инструментального узла различна для разных направлений, т.е. существуют главные оси [жесткости](#) (оси ε_1 и ε_2 на [рис. 11.1](#)), которые обычно не совпадают с координатными осями станка.

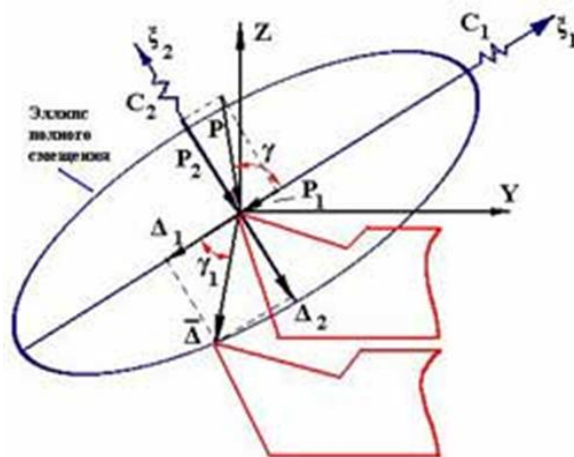


Рис. 11.1. Полярная диаграмма полного перемещения вершины резца под действием силы P

Статические жесткости C_1 и C_2 , измеренные в направлении этих осей, различны ($C_2 > C_1$). Любой вектор силы, приложенной к [инструменту](#), может быть разложен по главным осям. В результате составляющие перемещений по главным осям Δ_1 и Δ_2 будут обратно пропорциональны соответствующим жесткостям C_1 и C_2 . Это приводит к тому, что угол γ_1 , определяющий направление полного смещения вершины инструмента, не совпадает с углом γ , определяющим направление действия силы. Эти углы соотносятся в соответствии с выражением $C_2 \cdot \operatorname{tg} \gamma_1 = C_1 \cdot \operatorname{tg} \gamma$. Если взять единичную силу и проварьировать угол γ от 0 до 360°, фиксируя результирующие смещения, можно получить эллипс полного смещения ([рис. 11.1](#)). Вид этого эллипса целиком определяется конструктивными особенностями упругой системы в окрестностях инструментального узла.

Описанная в упрощенном варианте анизотропия упругой системы на плоскости на самом деле существует в пространстве и приводит к тому, что при нагружении резца силой, параллельной [скорости](#) резания, его вершина смещается не только в тангенциальном направлении, но и в каком-то ортогональном (радиальном при рассмотрении смещений на плоскости) направлении. Если при этом резец стремится углубиться в заготовку, то это явление называется «самозатягиванием», но чаще возникает ситуация отжатия резца от обрабатываемой поверхности.

При резании вершина резца находится в условиях всестороннего сжатия, где любые перемещения, кроме тангенциальных, стеснены. Силы, препятствующие движению резца в ортогональных направлениях определяются силами реакции со стороны [адгезионных](#) мостиков, действующих в окрестности вершины инструмента, и силами реакции со стороны образующейся стружки, сопротивляющейся отжиму и ортогональному перемещению инструмента. С адгезионными явлениями надо считаться даже при скоростях резания более 100 м/мин, где внешние признаки наростообразования отсутствуют. Адгезионные явления в окрестности радиуса скругления вершины резца присутствуют даже тогда, когда нарост визуально не обнаруживается. Снимаемый металл в районе вершины разделяется клином инструмента на два потока, и есть частицы на границе потоков, где их скорость равна нулю, что ведет к образованию прочных адгезионных мостиков. Силы реакции со стороны адгезионных мостиков и со стороны образующейся стружки препятствуют ортогональному смещению инструмента при его нагружении в процессе резания. Таким образом, инструмент в процессе резания в начальный период нагружения смещается преимущественно в тангенциальном направлении.

Как показано на [рис. 11.2](#), вершина резца из т. О перемещается под действием силы резания P по направлению скорости резания V в т. А, которая не лежит на векторе, по которому проходило бы смещение при отсутствии сдерживающих сил. В результате на вершину резца в радиальном направлении стала дополнительно действовать сила ΔP_y , являющаяся реакцией упругой системы на отклонение от направления. К моменту достижения вершиной точки А величины ΔP_y становится достаточно для осуществления сдвига элемента стружки. В момент сдвига нарушается равновесие сил, вершина инструмента приобретает относительную свободу и устремляется к новому положению равновесия по сложной траектории, показанной на [рис. 11.2](#) пунктиром. Далее цикл повторяется: на участке ОА колебательная система пополняется энергией во время движения вместе с поверхностью заготовки, которая расходуется при обратном движении по сложной траектории. Чем больше размер ОА, тем больше энергии запасает упругая система, тем больше размах обратной траектории. Количество потенциальной энергии, накапливаемой к моменту прихода в т. А, определяется силами, необходимыми для создания упругих и пластических [деформаций](#) стружки и материала заготовки, зависящими от режимов резания, [износа](#)

инструмента, физических свойств обрабатываемого материала (временное сопротивление, величина [упрочнения](#)). Надо добавить, что эта [энергия](#) обратно пропорциональна жесткости системы [СИД](#). Именно эта энергия определяет амплитуду автоколебаний при их возникновении. Однако интенсивных автоколебаний может и не возникать, если, например, потенциальная энергия выходит (релаксирует) малыми порциями, но с высокой частотой. Так и происходит при образовании сливной стружки. Здесь при единичном сдвиге потенциальная энергия уменьшается не до нуля, а только на небольшую величину, но сдвиги происходят с высокой частотой, что позволяет потенциальной энергии не накапливаться в системе СИД. Таким образом, опасность возникновения автоколебаний с большой амплитудой заключается не в самом количестве накопленной энергии, а в ее релаксации большими порциями.

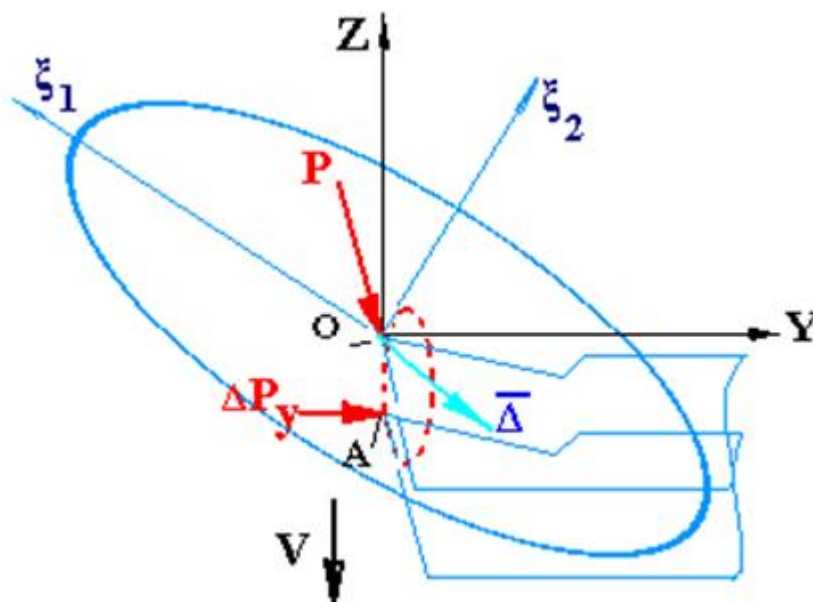


Рис. 11.2. Схема формирования колебательных движений вершины резца, возникающих с участием координатной связи

Наиболее негативными последствиями грозят [автоколебания](#) с траекториями, ориентированными преимущественно в радиальном направлении. Тангенциальное направление меньше влияет на увеличение шероховатости обработанной поверхности, хотя [адгезионное](#) взаимодействие по задней грани в процессе такого движения не всегда обеспечивает желаемую чистоту поверхности. При образовании сливной стружки создается стабильное давление на переднюю грань [инструмента](#). Это не позволяет инструменту существенно смещаться от поверхности резания. Автоколебания присутствуют и при сливном стружкообразовании (на стружке присутствуют едва заметные зубчики), но здесь сдвиг элемента стружки ведет к очень кратковременному освобождению вершины инструмента. При этом стружка не теряет своих упругих свойств и после сдвига быстро восстанавливает свое воздействие на инструмент, не позволяя ему существенно смещаться от поверхности резания. На [рис. 11.3](#) показаны примеры траекторий (точнее, проекции траекторий на плоскость, перпендикулярную поверхности резания), зафиксированных в разных частотных полосах при токарной обработке чугуна (сыпучая стружка) и алюминиевого сплава (стружка, близкая к сливной). На рисунке вертикальная ось совпадает с направлением скорости резания. Чугун и алюминиевый сплав обрабатывались в одинаковых условиях ([станок](#), [инструмент](#), режимы резания), но у чугуна траектории вытянуты в радиальном направлении, а у алюминиевого сплава они больше вытянуты вдоль скорости резания. Отдельные участки траекторий редко повторяют друг друга и не обязательно имеют форму эллипса. Чаще только внешний контур получающегося клубка траекторий имеет подобие эллипса. При возникновении интенсивных автоколебаний, сопровождаемых свистом, траектории движения вершины резца по форме уже больше напоминают эллипс.

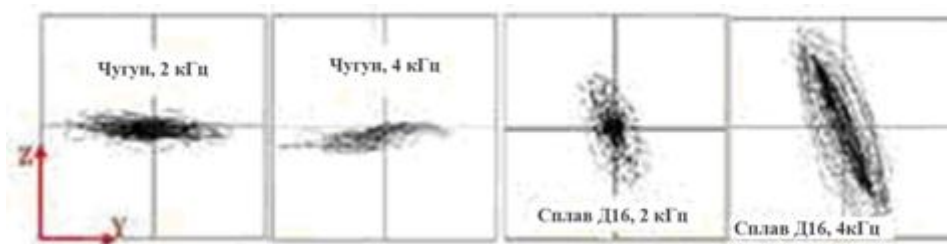


Рис. 11.3. Примеры траекторий колебательных движений резца в октавных полосах частот при точении чугуна и алюминиевого сплава

Опубликованные данные, посвященные вопросу величины и характера распределения нормальных и тангенциальных контактных давлений на задней поверхности режущего клина, ограничены и носят по преимуществу частный характер. Это объясняется, в том числе, и малой протяженностью контакта по задней поверхности, что затрудняет экспериментальные исследования, поэтому большое значение придается математическому моделированию.

Характер контактных давлений на участке *ОВ* задней грани режущего клина показан на [рис. 11.4](#). Максимальные значения нормальных $q_{\max}$ - и тангенциальных $t_{\max}$ - давлений расположены под вершиной режущего клина. Давления резко уменьшаются по мере удаления от вершины, а затем несколько увеличиваются.

Протяженность контакта по задней поверхности включает участок скругления режущей кромки, фаску [износа](#) и участок упругого восстановления. Рассчитаем протяженность контакта обработанной поверхности с задней гранью режущего клина d и определим вид функциональных зависимостей контактных [давлений](#) $q(z)$ и $t(z)$.

Протяженность контакта по задней грани рассчитывается следующим образом:

$$d = \rho \cdot \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) + h_3 + 4,83 \cdot \frac{q_{\max}}{E \cdot \sin \alpha}, \quad (11.1)$$

где: ρ – радиус скругления режущей кромки,

δ – угол резания,

h_3 – фаска на задней поверхности,

α – задний угол.

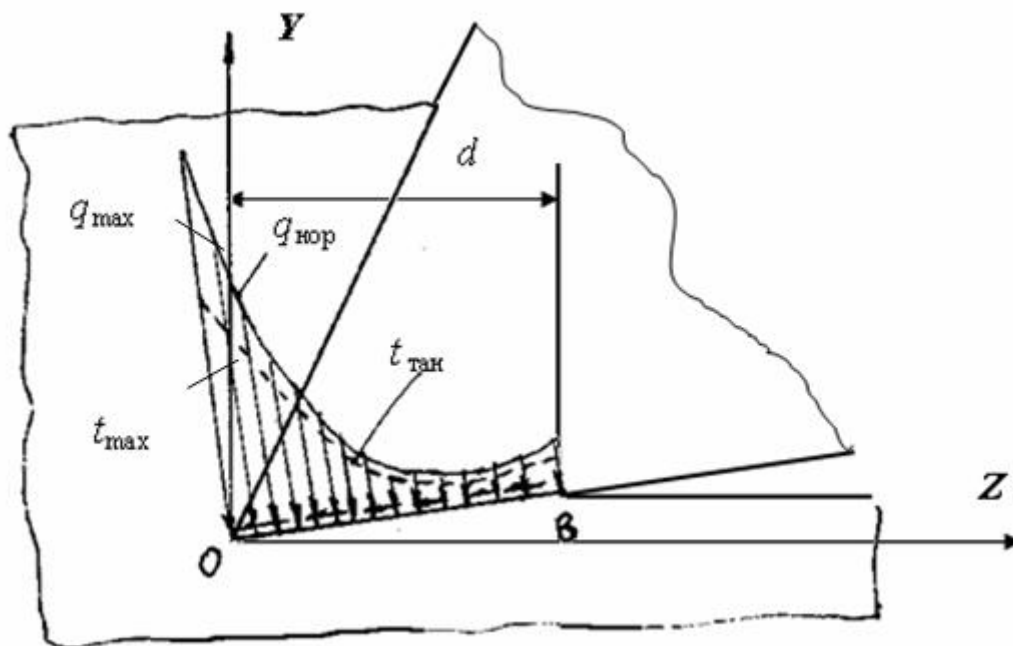


Рис. 11.4. Характер контактных давлений на задней поверхности режущего клина:

$q_{нор}$ – нормальные и $t_{тан}$ – тангенциальные, d – длина контакта по задней грани

При стружкообразовании в привершинной области режущего клина возникают многочисленные разнонаправленные микросколы, которые образуют текущую шероховатость обработанной поверхности. В следующие моменты времени за счет прохождения участков скругления режущей кромки и площадки [износа](#) эта текущая поверхность испытывает контактные давления, формирующие окончательный характер обработанной поверхности. Описанный процесс может быть рассмотрен как упруго-пластический контакт плоской поверхности площадки износа и шероховатой поверхности, элементы которой условно могут быть представлены в виде элементов цилиндрической формы. При такой постановке задачи может быть использована теория Герца о контакте цилиндрической поверхности с полуплоскостью и расчетная схема будет представлять собой полуэллиптическое распределение контактных [давлений](#).

Обработанные поверхности характеризуются не только шероховатостью, но и [волнистостью](#). Волны на поверхности детали имеют неправильную геометрическую форму, однако при расчетах могут удовлетворительно описываться синусоидой. Для характеристики волнистости используют шаг волны S_B и высоту H_B . В зависимости от видов обработки поверхности S_B изменяется от 0,25 до 104 мкм, а H_B – от 0,03 до 500 мкм. В расчетах параметров контактирования твердых тел часто используют радиусы закругления волн R . Анализ профилограмм (волнограмм) различных поверхностей показывает, что обычно отклонение в высоте волн достигает всего 15-20% от высоты максимальной волны, поэтому в первом приближении можно считать, что волны имеют цилиндрическую форму и все их вершины находятся на одном уровне ([рис. 11.5](#)).

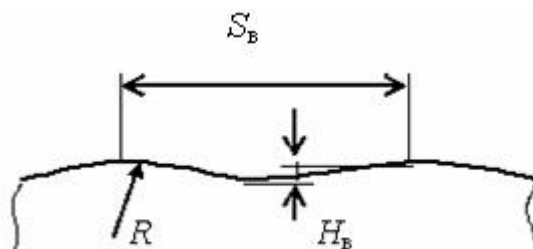


Рис. 11.5. Профиль волнистой поверхности:

H_B – высота волны, S_B – шаг волны, R – радиус закругления волн

Обычно полагают, что площадки контакта соседних неровностей с поверхностью располагаются на расстоянии, значительно большем, чем ширина площадки. В качестве примера была выбрана поверхность,

обработанная плоским [шлифованием](#), имеющая геометрические характеристики [волнистости](#) $\sigma_s = 3 \text{ мкм}$, $R = 30 \text{ мкм}$, $H_s = 3,75 \text{ мкм}$; коэффициент трения был принят равным 0,1. Для этих условий проведенный расчет позволил в среде Mathcad построить поля изолиний и максимальных касательных [напряжений](#) (рис. 11.6).

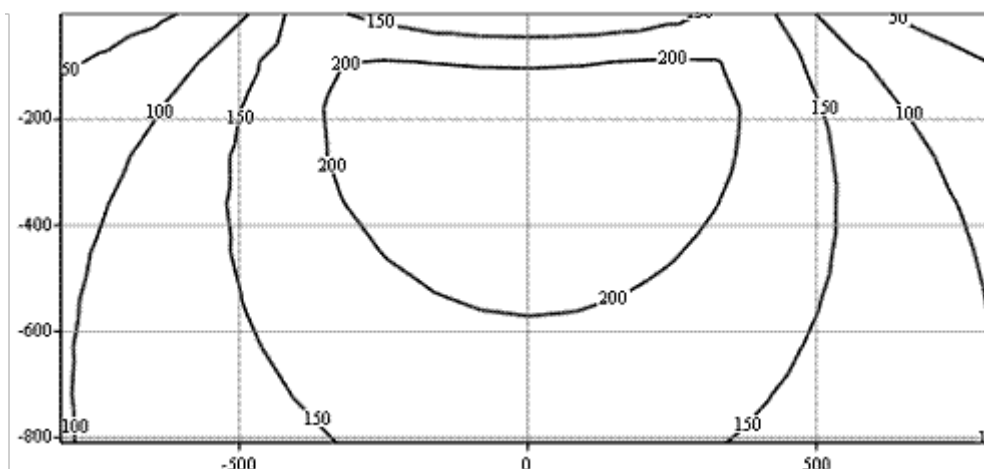


Рис. 11.6. Распределение максимальных касательных напряжений в МПа (расстояния по осям даны в мкм)

Как можно заметить, область максимального касательного напряжения располагается примерно на глубине 317 мкм и его величина составляет 238 МПа. Компьютерные эксперименты, выполненные с целью анализа взаимодействия напряженных областей при близкой локализации контактов, показали, что взаимное влияние соседних контактов выражается в расширении области наибольших значений максимальных касательных [напряжений](#) и перемещении этой области вглубь контактирующей поверхности.

ЛЕКЦИЯ 12

Дисбаланс вращающихся деталей станков. Дисбаланс обрабатываемых изделий

Шпиндели современных металлорежущих станков имеют высокие частоты вращения. Исходя из требований к точности обработки, вибрации шпинделя, как самого ответственного элемента динамической системы, должны быть минимальными. С этой целью при проектировании шпиндельного узла необходимо составить динамическую [модель](#) условий работы шпинделя, определить критические частоты узла, а также построить теоретическую [амплитудно-частотную характеристику \(АЧХ\)](#).

В прецизионных станках нашли применение аэростатические опоры ([см. рис. 12.1](#)), основным преимуществом которых является практически нулевое [трение](#), т.к. ротор и подшипник никогда не соприкасаются, а трение в воздушном зазоре ничтожно мало. Однако им присущ явный недостаток – низкая несущая способность (невысокая [жесткость](#)), что ограничивает область их применения.

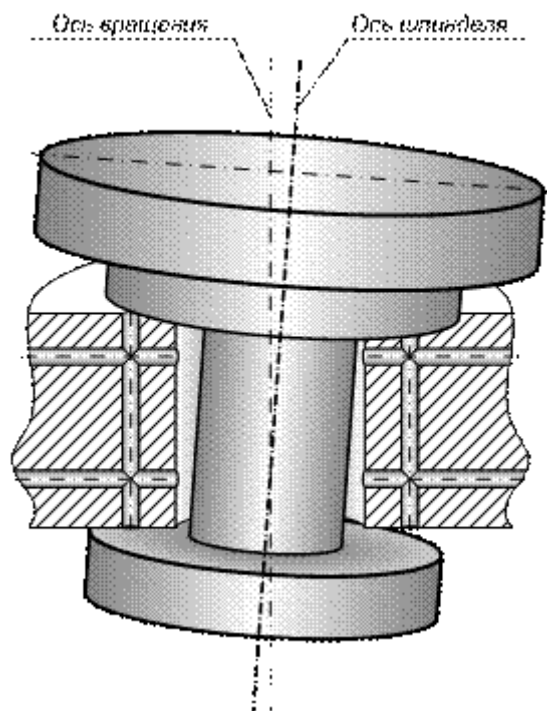


Рис. 12.1. Схема шпинделя на аэростатических опорах

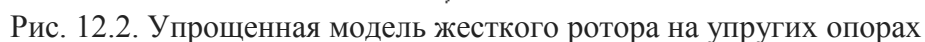
Рассмотрим задачу об определении закона движения шпинделя на аэростатических опорах с целью определения его резонансных частот и построения АЧХ и ФЧХ (фазово-частотную характеристику). На рис. 12.2 показана упрощенная модель упруго опертого жесткого ротора, часто рассматриваемая в научной литературе. Применение такой модели оказывается оправданным, если жесткость шпинделя значительно выше жесткости опор. В частности, подобная модель используется для выяснения закона движения некоторых типов веретен ткацких станков.

Для нахождения дифференциальных уравнений, описывающих закон движения подобной модели, рассматриваются уравнения Лагранжа 2-го рода в обобщенных координатах, в качестве которых выбираются координаты смещения оси цапф ротора относительно оси подшипников.

При анализе закона движения удобно использовать понятие центра жесткости (ЦЖ), относительно которого легко экспериментально установить упругие характеристики (радиальную и угловую жесткость) опор. Фактически в рассматриваемой системе ЦЖ будет являться точка на оси аэростатического подшипника, такая, что при приложении силы к ротору в плоскости, проходящей через эту точку и перпендикулярной оси подшипника (вращения), это вызовет только поступательное перемещение ротора. Таким образом, можно привести систему из двух опор с коэффициентами радиальной жесткости C_{y1} и C_{y2} к

одной упругой опоре с коэффициентом радиальной жесткости, равной $C_y = C_{y1} + C_{y2}$, и угловой

жесткостью $C_\varphi = C_{y1}a_1 + C_{y2}a_2$, где a_1 , a_2 – расстояния от ЦЖ до первой и второй опор соответственно. Обычно в литературе рассматривается статическая и динамическая задача с использованием теорем о движении центра масс и об изменении главного момента количества движения и выписываются дифференциальные уравнения. Однако недостатком такой модели является неудобный выбор обобщенных координат. Система рассматривается по отношению не к ЦЖ, а к центру масс (ЦМ). Для технологических машин это неудобно, так как при установке на шпиндель заготовок с различными массами изменяется и само положение ЦМ.



Интересным также является тот факт, что все модели дают разные уравнения движения. Как показывает расчет, при отсутствии установленной на шпинделе станка заготовки собственные частоты, определяемые по каждой из моделей, оказываются одинаковыми и мало отличаются от резонансных частот. При установке на шпиндель заготовки изменяются масса системы, моменты инерции и расстояние между ЦМ и ЦЖ, что приводит к различным результатам, и для отдельных моделей возникают большие или меньшие расхождения с экспериментальными данными. Упругие, демпфирующие и инерционные характеристики также оказывают влияние на поведение системы. Например, время прохождения системой резонанса (как при разгоне шпинделя, так и при свободном выбеге) заметно сказывается на амплитуде колебаний.

Для решения задачи воспользуемся принципом Даламбера, по которому следует, что все заданные силы F_k , реакции опор R_i и силы инерции $F_{ин}$ всех материальных точек данного тела уравниваются. Поэтому для данной модели можно составить шесть уравнений статического равновесия сил. Для этого необходимо приравнять нулю суммы проекций всех этих сил на оси x , y , z и сумму их моментов относительно этих осей.

Шпиндель станка поворачивается на угол $\varphi(t)$. Вектор угловой скорости тела, действующий вдоль оси z , будет равен:

$$\omega = \dot{\omega}t = \frac{d\varphi}{dt}k = \dot{\varphi}k \quad (12.1)$$

Угловое ускорение шпинделя

$$\varepsilon = \frac{d^2\varphi}{dt^2}k = \frac{d\omega}{dt}k = \dot{\omega}k = \dot{\omega}k \quad (12.2)$$

Разложим силу инерции шпинделя $F^{\text{ин}}$ на нормальную $F_n^{\text{ин}}$ и тангенциальную $F_\tau^{\text{ин}}$ составляющие, действующие соответственно вдоль радиуса вращения и перпендикулярно ему и направленные против центростремительного и тангенциального ускорения тела соответственно.

Сначала составим суммы проекций на оси x, y, z . Если обозначим касательное ускорение ЦМ через ω_τ , то

$$F_\tau^{\text{ин}} = -M\omega_\tau \quad (12.3)$$

Из кинематики известно, что касательное ускорение ω_τ , равно векторному произведению векторов ε и R , т.е.

$$\omega_\tau = \varepsilon \times R; \quad (12.4)$$

где R – радиус-вектор, проведенный из ЦЖ в ЦМ.

$$R = ix_M + jy_M + kz_M, \quad (12.5)$$

где i, j, k – орты осей x, y, z .

Выразим координаты ЦМ x_M, y_M, z_M через координаты x, y, z, α, β :

$$x_M = x + a\alpha; \quad y_M = y + a\beta; \quad z_M = a; \quad (12.6)$$

Подставляя (12.4) в (12.3) и учитывая (12.5) и (12.6), а также заменяя ε на ε_k , получим уравнения для проекций тангенциальной силы инерции шпинделя

$$F_x^{\text{ин}} = M\varepsilon(y + a\beta), \quad F_y^{\text{ин}} = -M\varepsilon(x + a\alpha), \quad F_z^{\text{ин}} = 0. \quad (12.7)$$

Перейдем к рассмотрению нормальной силы инерции. Нормальное ускорение [ротора](#) равно по модулю

$$\omega_n = r_M \omega^2 \quad (12.8)$$

Нормальная сила инерции

$$F_n^{\text{ин}} = Mr_M \omega^2. \quad (12.9)$$

Учитывая (12.9) и (12.6), находим уравнения для проекций нормальной силы инерции

$$F_x^{\text{ин}} = M\omega^2(x + a\alpha); \quad F_y^{\text{ин}} = M\omega^2(y + a\beta); \quad F_z^{\text{ин}} = 0 \quad (12.10)$$

Проектируя на координатные оси заданные реакции подшипников (приведенных к ЦЖ), получаем первые два уравнения рассматриваемой задачи в следующем виде:

$$\begin{cases} -C_x x + Mgy + Mga\beta + M\omega^2 x + M\omega^2 a\alpha = 0; \\ -C_y y - Mgx - Mga\alpha + M\omega^2 y + M\omega^2 a\beta = 0, \end{cases} \quad (12.11)$$

где C_x, C_y – приведенные радиальные жесткости вдоль осей x, y .

Учитывая приведение реакций опор к ЦЖ, можно записать

$$\begin{cases} -C_\alpha \alpha + J_{xx} \omega^2 + J_{xz} \varepsilon = 0; \\ C_\beta \beta - J_{yy} \omega^2 + J_{yz} \varepsilon = 0; \\ \sum T_x - J_x \varepsilon = 0, \end{cases} \quad (12.12)$$

где J_{zx}, J_{yz} – центробежные моменты инерции;

J_z – осевой момент инерции;

$\sum T_x$ – сумма внешних моментов, действующих на [роотор](#) (как приводящих его во вращение, так и тормозящих его);

C_α, C_β – приведенные угловые [жесткости](#).

Приведенная система (12.12) содержит центробежные моменты инерции, являющиеся функциями координат x, y, α, β . Поэтому целесообразно выразить величины J_{zx}, J_{yz} через моменты инерции ротора и соответствующие координаты:

$$\begin{aligned} J_{xx} &= MZ_M x_M + \delta_{11} \delta_{31} (J_{x2} - J_{x2}) + \delta_{12} \delta_{32} (J_{x2} - J_{y2}); \\ J_{yy} &= My_M z_M + \delta_{21} \delta_{31} (J_{x2} - J_{x2}) + \delta_{22} \delta_{32} (J_{x2} - J_{y2}), \end{aligned} \quad (12.13)$$

где J_{22}, J_{y2} – осевые (экваториальные) моменты инерции ротора;

δ – направляющие косинусы;

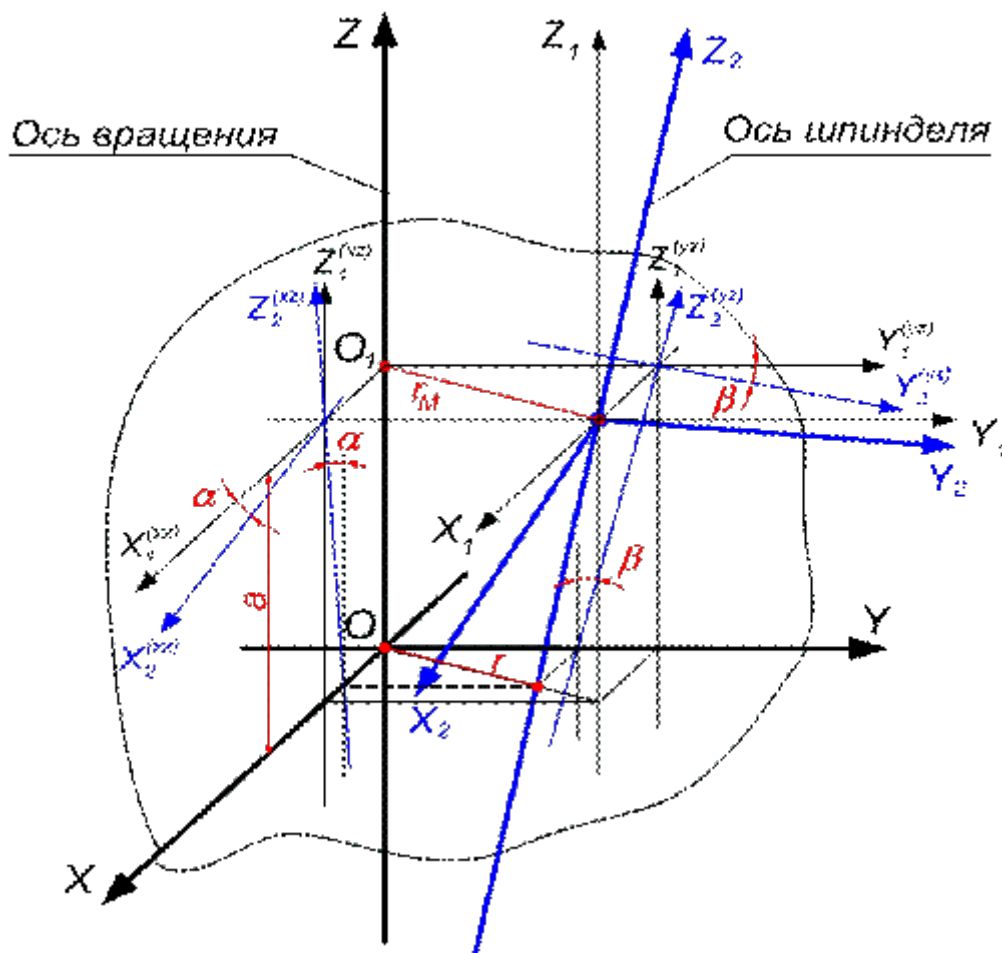


Рис. 12.3. Схема перехода от моментов инерции относительно осей x, y, z к моментам инерции ротора

$$\begin{aligned}
\delta_{11} &= \cos(i_1, i_2) = \cos(\alpha); \\
\delta_{12} &= \cos(i_1, j_2) = \cos(90^\circ); \\
\delta_{21} &= \cos(j_1, i_2) = \cos(90^\circ); \\
\delta_{22} &= \cos(j_1, j_2) = \cos(\beta); \\
\delta_{31} &= \cos(k_1, i_2) = \cos(90^\circ + \alpha); \\
\delta_{32} &= \cos(k_1, j_2) = \cos(90^\circ + \beta); \\
\delta_{33} &= \cos(k_1, k_2) = \cos(\sqrt{\alpha^2 + \beta^2});
\end{aligned} \tag{12.14}$$

Подставляя (12.6) и (12.14) в (12.13) и упрощая, получим

$$\begin{aligned}
J_{xx} &= Ma(x + a\alpha) - \alpha(J_{x2} - J_{y2}); \\
J_{yy} &= Ma(y + a\beta) - \beta(J_{x2} - J_{y2}).
\end{aligned} \tag{12.15}$$

Осевой момент J_z также удобно выразить через моменты инерции, принадлежащие непосредственно [ротору](#). Осевой момент инерции, проходящий через произвольную ось, можно выразить как

$$J_z = Mr_M^2 + J_{x2}\delta_{13} + J_{y2}\delta_{23} + J_{z2}\delta_{33}. \tag{12.16}$$

Подставляя (12.14) в (12.16), получим

$$J_z = Mr_M^2 + J_{x2} - J_{x2}\alpha - J_{y2}\beta.$$

Таким образом, можно переписать окончательно систему уравнений

$$\left\{ \begin{aligned}
&x(M\omega^2 - C_x) + y(M\varepsilon) + \alpha(M\omega^2 a) + \beta(Ma\varepsilon) = 0; \\
&x(-M\varepsilon) + y(M\omega^2 - C_y) + \alpha(-Ma\varepsilon) + \beta(M\omega^2 a) = 0; \\
&x(Ma\omega^2) + y(Ma\varepsilon) + \alpha(\omega^2(Ma^2 - J_{x2} + J_{y2}) - C_a) + \\
&+ \beta(\varepsilon(Ma^2 - J_{x2} + J_{y2})) = 0; \\
&x(Ma\varepsilon) + y(-Ma\omega^2) + \alpha(\varepsilon(Ma^2 - J_{x2} + J_{y2})) + \\
&+ \beta(\omega^2(-Ma^2 + J_{x2} - J_{y2}) + C_p) = 0; \\
&(M((x + a\alpha)^2 + (y + a\beta)^2) + J_{x2} - J_{x2}\alpha - J_{y2}\beta)\varepsilon = \sum T_x.
\end{aligned} \right. \tag{12.17}$$

Для случая постоянной частоты вращения [шпинделя](#) ($\omega = \text{const}$, $\varepsilon = 0$), имеем

$$\left\{ \begin{aligned}
&x(M\omega^2 - C_x) + \alpha(Ma\omega^2) = 0; \\
&y(M\omega^2 - C_y) + \beta(Ma\omega^2) = 0; \\
&x(Ma\omega^2) + \alpha(\omega^2(Ma^2 - J_{x2} + J_{y2}) - C_a) = 0; \\
&y(-Ma\omega^2) + \beta(\omega^2(-Ma^2 + J_{x2} - J_{y2}) + C_p) = 0; \\
&0 = \sum T_x.
\end{aligned} \right. \tag{12.18}$$

Следует обратить внимание, что координатные оси выбраны таким образом, чтобы плоскость xz проходила через ЦМ. При равенстве моментов инерции ротора J_{x2} , J_{y2} , радиальных и угловых жесткостей значения смещений и угловых отклонений $x = y$, $\alpha = \beta$ система распадается на два одинаковых частотных уравнения, определяющих собственные [частоты](#) модели. Собственные частоты находятся из условия ненулевого решения системы – равенства нулю определителя. Одно из биквадратных частотных уравнений принимает вид

$$(M\omega^2 - C_x) \cdot (\omega^2(Ma^2 - J_{x2} + J_{y2}) - C_a) - \alpha M\omega^2 a \cdot Ma\omega^2 = 0. \tag{12.19}$$

Для построения АЧХ необходимо также добавить вынуждающую силу. Условно приложим единичную силу $F_1=1H$ к ЦМ шпинделя, которая будет действовать с частотой ω . Направление силы можно выбрать произвольно, но для простоты выкладок удобно принять, что сила F_1 направлена так же, как и нормальная сила инерции. При таком выборе проекции силы на оси x, y будут равны $F_1^x = F_1 \cdot \cos \gamma$; $F_1^y = F_1 \cdot \sin \gamma$, где γ – угол между плоскостью, проходящей через ось z и ЦМ, и плоскостью xz . Дополнительно, сила F_1 будет создавать момент вокруг оси осей x, y , поэтому система принимает вид

$$\begin{cases} x(M\omega^2 - C_x) + \alpha M\omega^2 a = -F_1^x; \\ xMa\omega^2 + \alpha(\omega^2(Ma^2 - J_{x2} + J_{y2}) - C_a) = -F_1^x a. \end{cases} \quad (12.20)$$

Решение системы (12.20) для каждой частоты дает АЧХ системы.

Рассмотренная математическая модель должна быть уточнена, так как при ее выводе был принят ряд допущений (см. выше). Необходимо ввести в нее радиальное и угловое демпфирование, а также вынуждающую силу в виде точечной массы в верхней плоскости (плоскости установки заготовки) (рис. 12.4). Любой жесткий роптор можно представить как идеально сбалансированное тело относительно оси вращения, и пару неуравновешенных сил, действующих в плоскостях коррекции. В нашем случае, когда на номинально сбалансированный шпиндель устанавливается заготовка с эксцентриситетом, появляющийся дисбаланс может быть представлен только одной неуравновешенной массой m , расположенной на радиусе r_d , вызывающей силы f_x^{un}, f_y^{un} в плоскости коррекции, максимально близкой к центру масс заготовки.

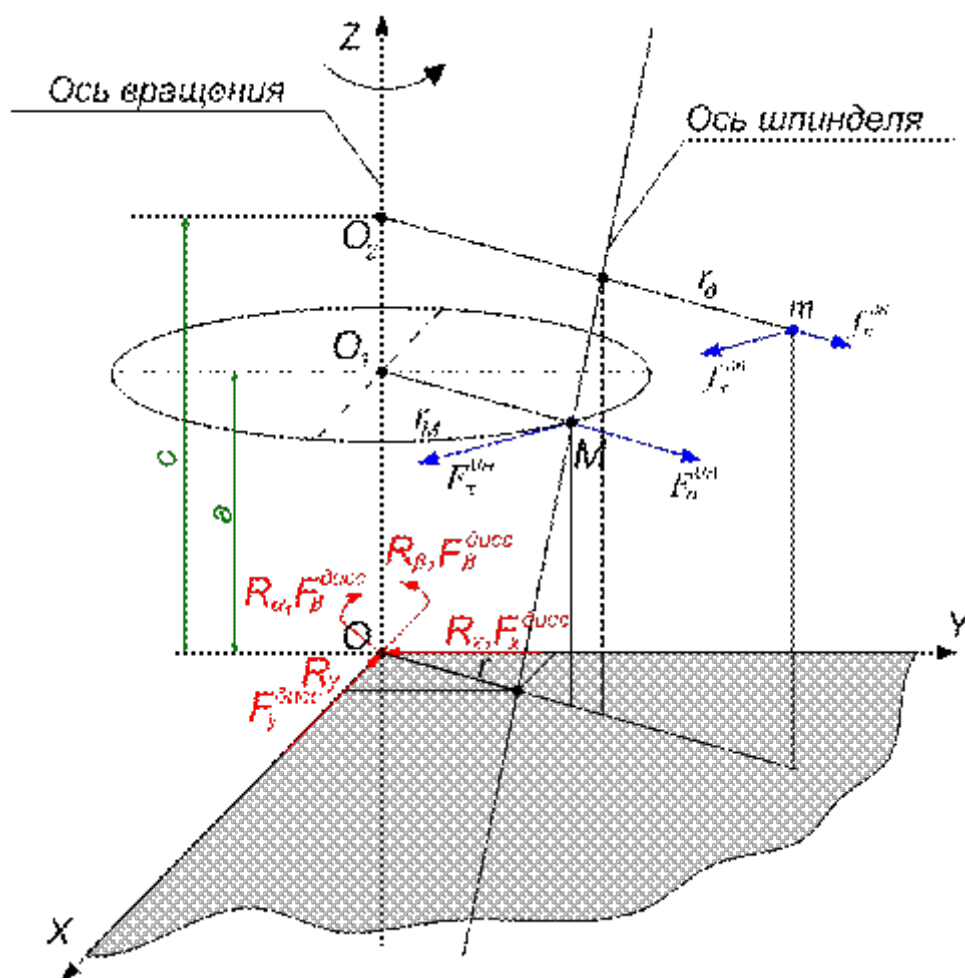


Рис. 12.4. Усложненная модель шпинделя на аэростатических опорах

В систему (12.17) целесообразно заложить и условия работы шпинделя – свободный выбег, путем задания закона изменения угловой скорости во времени. Такой закон можно задавать как аналитически, так и на основании экспериментальных данных.

Для ввода демпфирования в систему (12.17) примем, что диссипативные силы пропорциональны первой производной по скорости. Для нашего случая радиальные силы демпфирования $F_x^{diss} = i\alpha\omega H_x$; $F_y^{diss} = i\beta\omega H_y$, а угловые $F\alpha_x^{diss} = i\bar{\alpha}\omega H_{\alpha}$; $F\beta^{diss} = i\bar{\beta}\omega H_{\beta}$, где $H_x, H_y, H_{\alpha}, H_{\beta}$ – коэффициенты сил и моментов сопротивления; i – мнимая единица, $\bar{\alpha}, \bar{\beta}$ – комплексные амплитуды.

Таким образом, имеем систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{x}((M+m)\omega^2 - iH_x\omega - C_x) + \bar{y}((M+m)\epsilon) + \bar{\alpha}((Ma+mc)\omega^2) + \bar{\beta}((Ma+mc)\epsilon) = \\ = -mr'_x\omega^2 - mr'_y\epsilon, \\ \bar{x}(-(M+m)\epsilon) + \bar{y}((M+m)\omega^2 - iH_y\omega - C_y) + \bar{\alpha}(-(Ma+mc)\epsilon) + \bar{\beta}((Ma+mc)\omega^2) = \\ = -mr'_x\omega^2 + mr'_y\epsilon, \\ \bar{x}((Ma+mc)\omega^2) + \bar{y}((Ma+mc)\epsilon) + \bar{\alpha}(\omega^2(Ma^2 + mc^2 - J_{x2} + J_{y2}) - iH_{\alpha}\omega - C_{\alpha}) + \\ + \bar{\beta}(\epsilon(Ma^2 + mc^2 - J_{x2} + J_{y2})) = -mr'_x\omega^2 - mr'_y\epsilon, \\ \bar{x}((Ma+mc)\epsilon) + \bar{y}(-(Ma+mc)\omega^2) + \bar{\alpha}(\epsilon(Ma^2 + mc^2 - J_{x2} + J_{y2})) + \\ + \bar{\beta}(\omega^2(-Ma^2 - mc^2 + J_{x2} - J_{y2}) + iH_{\beta}\omega + C_{\beta}) = mr'_x\omega^2 - mr'_y\epsilon, \\ \omega = f(t). \end{array} \right. \quad (12.21)$$

Частотные характеристики моделей (12.20) и (12.21) представлены на [рис. 12.5](#) и [12.6](#).

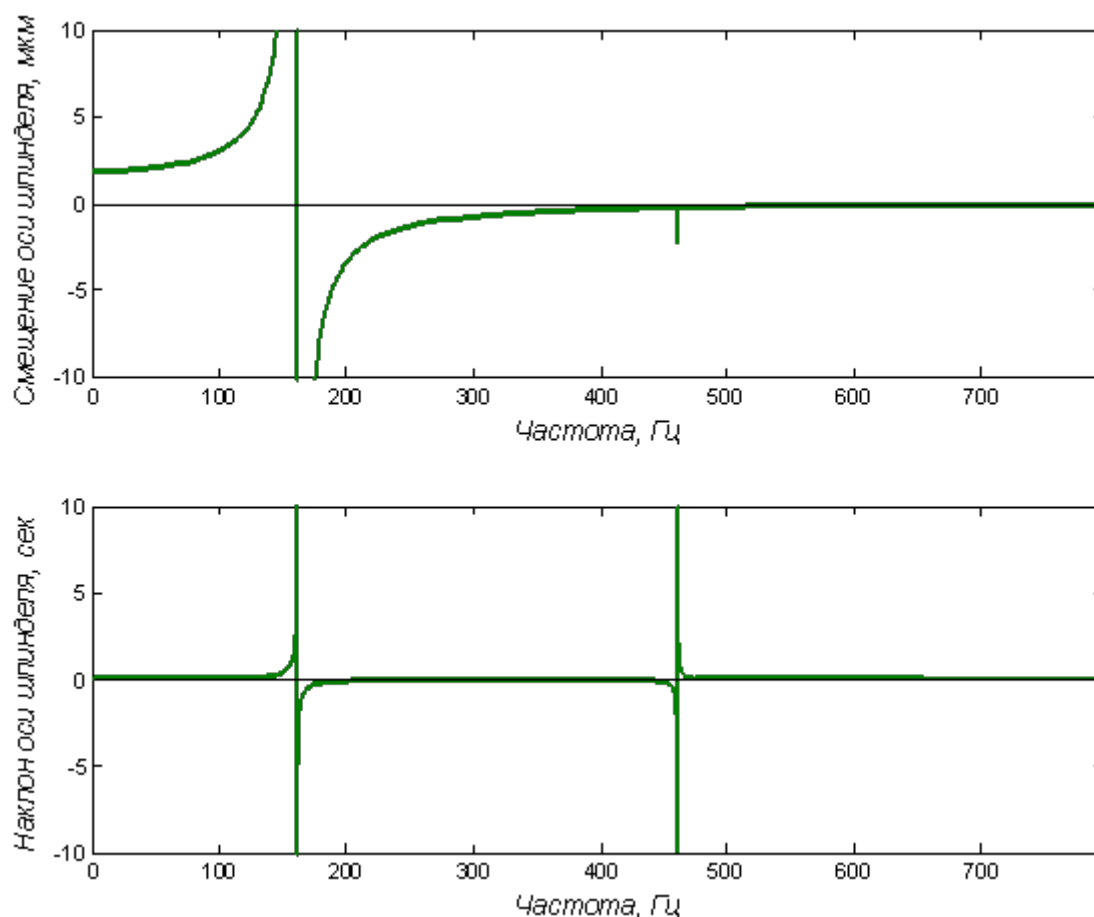


Рис. 12.5. Характеристики $x(\omega)$, $\alpha(\omega)$ упрощенной модели (12.20) Параметры модели:

$M = 37.2$ кг, $J_{x2} = J_{y2} = 0.294$ кг·м², $J_{z2} = 0.22$ кг·м², $C_x = C_y = 3.8 \cdot 10^7$ Н/м, $C_{\alpha} = C_{\beta} = 6.2 \cdot 10^5$ Н·м/рад, $a = 0.002$ м, $F_1 = 100$ Н, $\gamma = 45^\circ$

На основании сравнительного анализа можно сделать следующие выводы:

1. Демпфирование системы существенно влияет на амплитуду колебательного процесса, особенно вблизи резонанса, и поэтому модель, в которой пренебрегают диссипативными силами, может быть использована только для приближенного анализа динамических характеристик системы, например, для определения собственных частот.

2. Демпфирование мало влияет на собственные частоты. Проведенный анализ показал, что при различных изменяемых параметрах модели (масса системы, моменты инерции) значения собственных частот практически не изменяются в диапазонах реальных значений диссипативных характеристик системы (при $\nu_{\text{рад}} < 0.5\nu_{\text{рад(кр)}}$, $\nu_{\text{угл}} < 0.5\nu_{\text{угл(кр)}}$), где:

$\nu_{\text{рад}}$, $\nu_{\text{угл}}$ – коэффициенты радиального и углового демпфирования,

$\nu_{\text{рад(кр)}}$ = $\omega_0(\text{рад})$, $\nu_{\text{угл(кр)}}$ = $\omega_0(\text{угл})$ – критические коэффициенты радиального и углового затухания.

Физически поведение системы на данных частотах не будет иметь резонансный характер вследствие большой диссипации энергии.

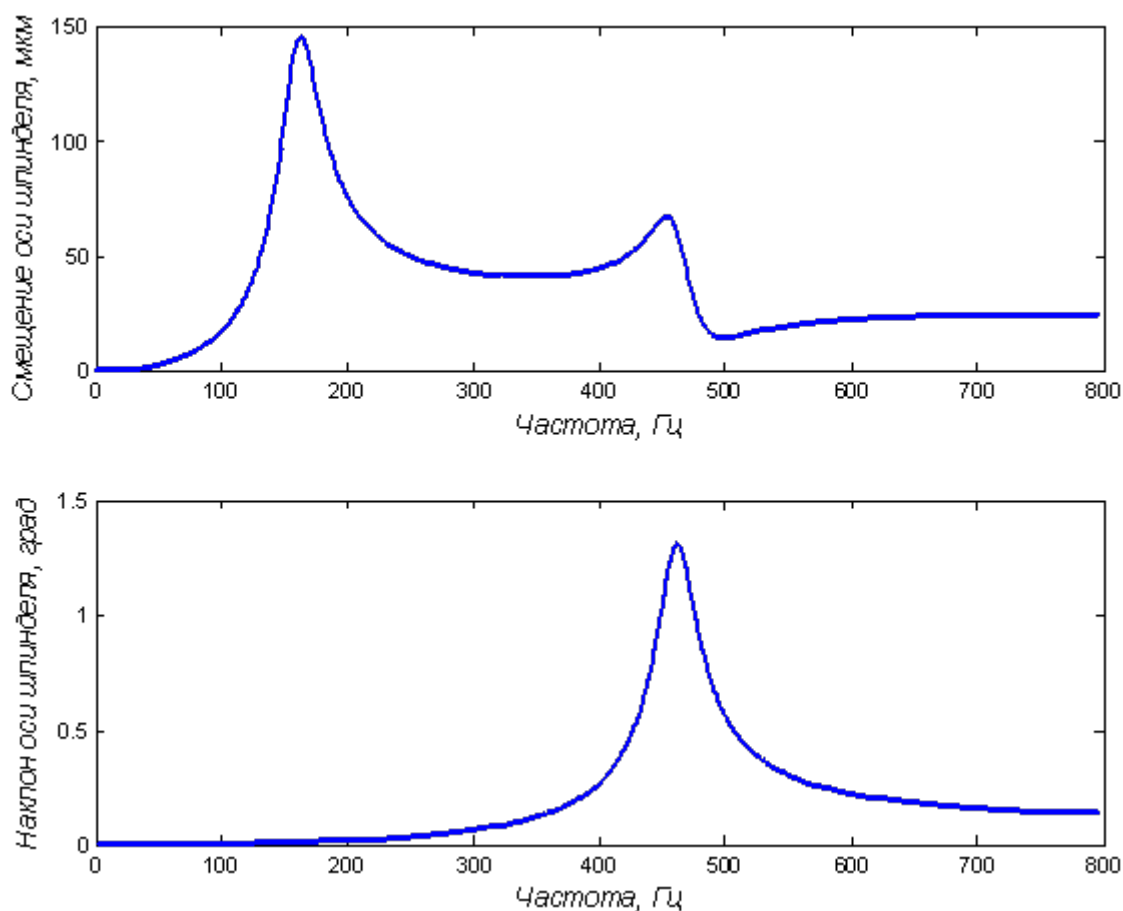


Рис. 12.6. Характеристики $|\bar{x}(\omega)|$, $|\bar{\alpha}(\omega)|$ усложненной модели (12.21) Параметры модели:

$$M = 37.2 \text{ кг}, J_{x2} = J_{y2} = 0.294 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, J_{z2} = 0.22 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, C_x = C_y = 3.8 \cdot 10^7 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{м}}, C_\alpha = C_\beta = 6.2 \cdot 10^5 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{рад}},$$

$$\vartheta_x = \vartheta_y = 0.1 \cdot \vartheta_{\text{рад(кр)}} \frac{\text{Н}}{(\text{м} / \text{с})}, \vartheta_\alpha = \vartheta_\beta = 0.1 \cdot \vartheta_{\text{угл(кр)}} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{(\text{рад} / \text{с})}, a = 0.002 \text{ м}, m = 5 \text{ г}, r_d =$$

$$0.3 \text{ м}, c = 0.114 \text{ м}, \gamma = 45^\circ, \text{ закон изменения частоты – Линейный с } 5000 \text{ рад/сек до } 0 \text{ за } t = 100 \text{ с.}$$

3. В отсутствие точных теоретических и экспериментальных данных о диссипативных частотных характеристиках аэростатических подшипников полученные АЧХ являются приближенными. Поэтому разработанная модель (2.21) может быть использована для описания поведения системы на низких частотах (до 500-600 Гц), являющихся рабочими.

4. Пренебрежение касательными силами инерции оправдано практически для всех диапазонов частот, кроме резонансных, при очень малом демпфировании, на которых происходит изменение амплитуды колебаний в зависимости от скорости прохождения резонансов.

Рассмотренная модель учитывает большее количество динамических элементов системы (демпфирование, касательные силы инерции). При задании соответствующих параметров модели разработанная система уравнений 1(2.21) позволяет получать частотные зависимости амплитуд и фаз колебаний для любых жестких [роторов](#), работающих в сходных условиях, описывать их поведение, как при разгоне, так и при свободном выбеге.

ЛЕКЦИЯ 13

Колебания из-за неточности изготовления и сборки узлов, колебания фундаментов

Большая часть внешних воздействий, определяющих форму и шероховатость обработанной поверхности при особо точном [точении](#), в той или иной степени уменьшается при изготовлении особо точного станка конструктивными и технологическими приемами:

- конструкцией аэростатических опор в шпиндельном узле и направляющих механизма [подачи](#);
- массивным фундаментом и установкой станины на виброизолирующих аэростатических опорах;
- высокой точностью изготовления поверхностей опор и направляющих;
- точением на выбеге [шпинделя](#).

Требования, предъявляемые к точности обработанной поверхности (например, плоская поверхность металлического зеркала должна иметь: общее отклонение формы на диаметре 250 мм – не более 1 мкм; волнистость, то есть местное отклонение формы на длине 25 мм – не более 100 нм;

шероховатость R_a – 25 нм), определяют допустимые значения дисбаланса шпинделя с установленной на нем [деталью](#). Если шероховатость поверхности при тонком алмазном точении определяется в основном физикой процесса резания и технологическими факторами, то силы дисбаланса, влияя на траекторию формообразующего движения, оказываются одной из важнейших причин общего [отклонения формы](#) и [волнистости](#) обработанной поверхности. Так, экспериментальные исследования с помощью многофакторного планирования выявили, что именно величина дисбаланса и частота вращения шпинделя являются доминирующими факторами, определяющими волнистость торцевой поверхности при алмазном точении.

Ориентировочные расчеты (без учета динамики шпинделя) показали, что при строгих допусках на общее отклонение формы и волнистость поверхности (соответственно менее 100 нм и 10 нм) дисбаланс, возникающий из-за срезания неравномерного припуска (даже у идеально сбалансированного шпинделя с заготовкой), может явиться причиной выхода обработанной поверхности из указанных полей допусков. Поэтому была поставлена задача разработки математической [модели](#), позволяющей рассчитывать отклонения формы поверхности с учетом дисбаланса, изменяющегося в процессе резания.

В качестве примера рассмотрим схему резания от центра к периферии при точении торца плоского диска с центральным отверстием ([рис. 13.1](#)). Положим, что обрабатываемая точением плоская поверхность должна иметь особо высокую точность формы (металлическое зеркало, диск памяти и т.п.).

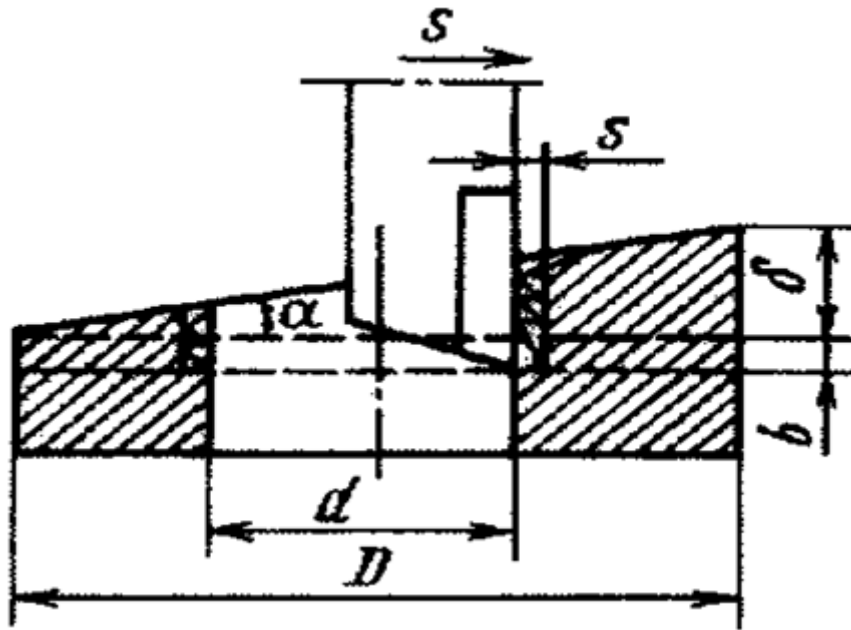


Рис. 13.1. Схема точения заготовки с отклонением торца от перпендикулярности относительно оси вращения

Положим также, что обработка ведется на выбеге идеально сбалансированного [шпинделя](#), так что внешние воздействия на процесс резания исключаются. Пусть плоские поверхности исходной заготовки имеют отклонение от параллельности δ на диаметре D . Тогда на одном обороте обрабатываемой детали будет срезана фигура, показанная на [рис. 13.1](#) крестообразной штриховкой и представляющая собой полый цилиндр диаметром d и толщиной стенки s , причем верхняя грань цилиндра наклонена к основанию под углом $\alpha = \arctg(\delta / D)$.

Масса этого цилиндра рассчитывается по такой формуле:

$$m_i = \pi \cdot \rho \cdot s \cdot (d + i \cdot s) \cdot (b_0 + b_i + \delta / 2) \quad (13.1)$$

$$(i = 1, 2, \dots, N; N = \text{int}((D - d) / (2 \cdot s)))$$

где: b_0 – номинальный припуск,

b_i – длина наименьшей образующей срезаемого цилиндра,

s – подача резца на оборот детали,

δ – максимальное отклонение торцов заготовки от параллельности,

ρ – плотность материала заготовки,

i – порядковый номер оборота, начиная с первого.

Поскольку нижняя часть цилиндра (с образующей $b_0 + b_i$) симметрична относительно оси вращения и не оказывает влияния на дисбаланс, из дальнейших расчетов она исключается.

Теперь найдем, как меняется положение центра массы срезаемых цилиндров после каждого оборота. Принимаем, что при срезании первого цилиндра центр массы совпадает с центром вращения, а затем в течение каждого последующего оборота центр массы будет занимать стабильное положение, соответствующее положению, зафиксированному в конце предыдущего оборота. Ввиду несимметрии срезаемой фигуры целесообразно перейти к цилиндрическим координатам (r, φ, z) , полагая:

$$x = r \cdot \cos \varphi, \quad y = r \cdot \sin \varphi, \quad z = z,$$

Расстояние центра массы срезаемого цилиндра от оси вращения выражается следующим образом:

$$y_{0,i} = \frac{1}{V_i} \cdot \iiint_V y \cdot dx \cdot dy \cdot dz = \frac{1}{V_i} \cdot \int_{r_{1,i}}^{r_{2,i}} \int_0^{2\pi} \int_0^{\delta} r^2 \cdot \cos \varphi \cdot dr \cdot d\varphi \cdot dz \quad (13.2)$$

где: $V_i = m_i / \gamma$ – объем срезаемого цилиндра,

$$z_i = y_i \cdot \delta / D + (d_i / 2 + s_0) \cdot \delta / D,$$

$$r_{1,i} = d_i / 2,$$

$$r_{2,i} = d_i / 2 + s_0.$$

Опуская промежуточные вычисления, имеем:

$$y_{0,i} = \frac{(d/2 + i \cdot s_0)^2 + (d/2 + (i-1) \cdot s_0)^2}{(d/2 + i \cdot s_0)} \quad (13.3)$$

Из формул (13.1) и (13.3) следует, что по мере продвижения резца от центра к периферии увеличивается как срезаемая за каждый оборот цилиндра масса, так и расстояние центра этой массы от оси вращения. В результате возникает переменный во времени и пространстве момент центробежной силы относительно центра жесткости, что меняет соответствующим образом расстояние от вершины резца до базовой плоскости и тем самым определяет отклонение формы обрабатываемой поверхности.

Амплитудные значения моментов центробежной силы для каждого оборота подсчитываются по формуле:

$$M_{y,i} = l \cdot m_{(i-1)} \cdot y_{(i-1)} \cdot \omega^2 \quad (13.4)$$

где: l – расстояние от плоскости резания до центра жесткости,

$m_{(i-1)}$ – масса, срезанная за предыдущий оборот,

$y_{(i-1)}$ – расстояние от оси вращения до центра массы, срезанной за предыдущий оборот,

ω – частота вращения шпинделя.

На рис. 13.2 показана кривая изменения моментов центробежной силы в процессе резания. При большой частоте вращения, характерной для особо точного точения, длительность одного оборота составляет около 0,03 сек, поэтому, переходя к анализу динамики, целесообразно заменить указанную кривую изменения последовательностью кратковременных прямоугольных импульсов с тем, чтобы использовать известные в теории колебаний формулы переходного процесса при неустойчившихся колебаниях.

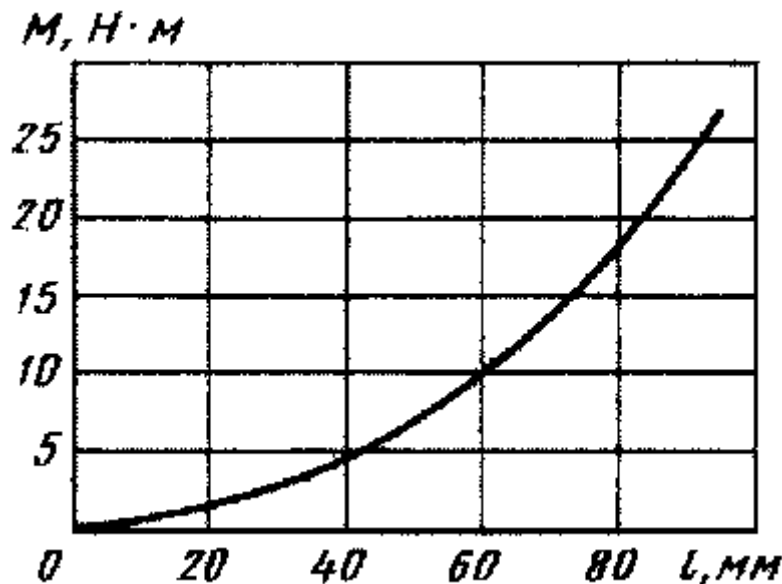


Рис. 13.2. Характер изменения момента центробежной силы относительно центра жесткости по мере движения режущего клина к периферии заготовки

Теоретический анализ (подтвержденный экспериментальными исследованиями) изменения положения [шпинделя](#) особо точного токарного станка, вызванного линейными и угловыми колебаниями, позволяет описать колебания шпинделя в виде двухсвязной модели такой системой уравнений:

$$\begin{aligned} m \cdot \ddot{x} + m \cdot l_1 \cdot \ddot{\varphi} + C_1 \cdot x + C_1 \cdot l_1 \cdot \varphi &= D \cdot \omega^2 \cdot y_0 \cdot \cos \omega \cdot t, \\ J \cdot \ddot{\varphi} + m \cdot l_1 \cdot x + C_1 \cdot l_1 \cdot x + C_2 \cdot \varphi &= D \cdot \omega^2 \cdot l_2 \cdot y_0 \cdot \cos \omega \cdot t, \end{aligned} \quad (13.5)$$

где: m и J – приведенные масса и момент инерции,
 C_1 и C_2 – приведенные радиальная и угловая жесткости,

x и φ – линейная и угловая координаты,

ω – частота вращения шпинделя,

l_1, l_2 – расстояния соответственно между центром массы и центром жесткости шпинделя и между центром жесткости и поверхностью резания,

D – дисбалансная масса,

y_0 – расстояние дисбалансной массы от оси вращения.

Расчеты показывают, что коэффициенты инерционной связи и упругой связи, а также коэффициент связанности линейных и угловых колебаний в рассматриваемой системе очень невелики – они составляют соответственно:

$$\gamma_1^2 = 0,069, \quad \gamma_2^2 = 0,047 \quad \text{и} \quad \sigma = 0,115.$$

Поэтому при расчетах принимаем односвязную модель, тем более что речь идет о кратковременном переходном процессе.

Тогда переходный процесс образования [отклонений формы](#) обрабатываемого торца будет описываться следующей формулой:

$$q_i = \frac{M_{\varphi,(i-1)}}{J} \cdot \left(1 - \cos \omega_0 t + q_{(i-1)} \cdot \cos \omega_0 t + \frac{q_{(i-1)}}{\omega_0} \cdot \sin \omega_0 t \right) \quad (13.6)$$

где: J – момент инерции системы "шпиндель-заготовка",

$M_{\varphi,(i-1)}$ – крутящий момент центробежной дисбалансной силы, вызванной срезанием несимметричной массы на предыдущем обороте,

q_i – отклонение формы поверхности на i -ом обороте,

$q_{(i-1)}$ и $\dot{q}_{(i-1)}$ – соответственно относительное перемещение и относительная [скорость](#) колебательного движения в конце предшествующего оборота, являющиеся начальными условиями для i -го оборота,

t – продолжительность одного оборота,

ω_0 – собственная [частота](#) угловых колебаний шпинделя.

В формуле (13.6) отсутствуют члены, описывающие демпфирующие свойства системы, поскольку продолжительность импульса очень мала и [демпфирование](#) в аэростатических подшипниках невелико. Выполненные на ПК расчеты показали, что ошибка, вносимая пренебрежением демпфированием [колебаний](#), в данных условиях не превышает 2,5%.

На [рис. 13.3](#) показаны результаты расчета для случая [точения](#) медной заготовки диаметром 250 мм с центральным отверстием 60 мм при отклонении торцов заготовки от параллельности 100 мкм. При полной [балансировке](#) отклонения от плоскостности постепенно нарастают от центра к периферии, так как увеличивается и момент центробежной силы, вызванной нарастающим дисбалансом, и расстояние от оси вращения до точки контакта [резца](#) и [заготовки](#). Максимальное отклонение составляет 6,38 мкм. Компьютерные эксперименты показали, что если проводить не полную, а частичную балансировку неравномерности распределения массы, определяемой отклонениями формы заготовки, можно в значительной мере снизить погрешности формы плоской обработанной поверхности ([рис. 13.3](#)). Наилучшие результаты были зафиксированы в условиях 38-процентной балансировки – максимальное отклонение от плоскостности составило 3,48 мкм. Результаты расчетов на ПК также показывают, что при более высоких требованиях к отклонениям формы детали необходимо выполнять, по крайней мере, два прохода – предварительный и окончательный – даже при весьма точной исходной заготовке и тщательной балансировке.

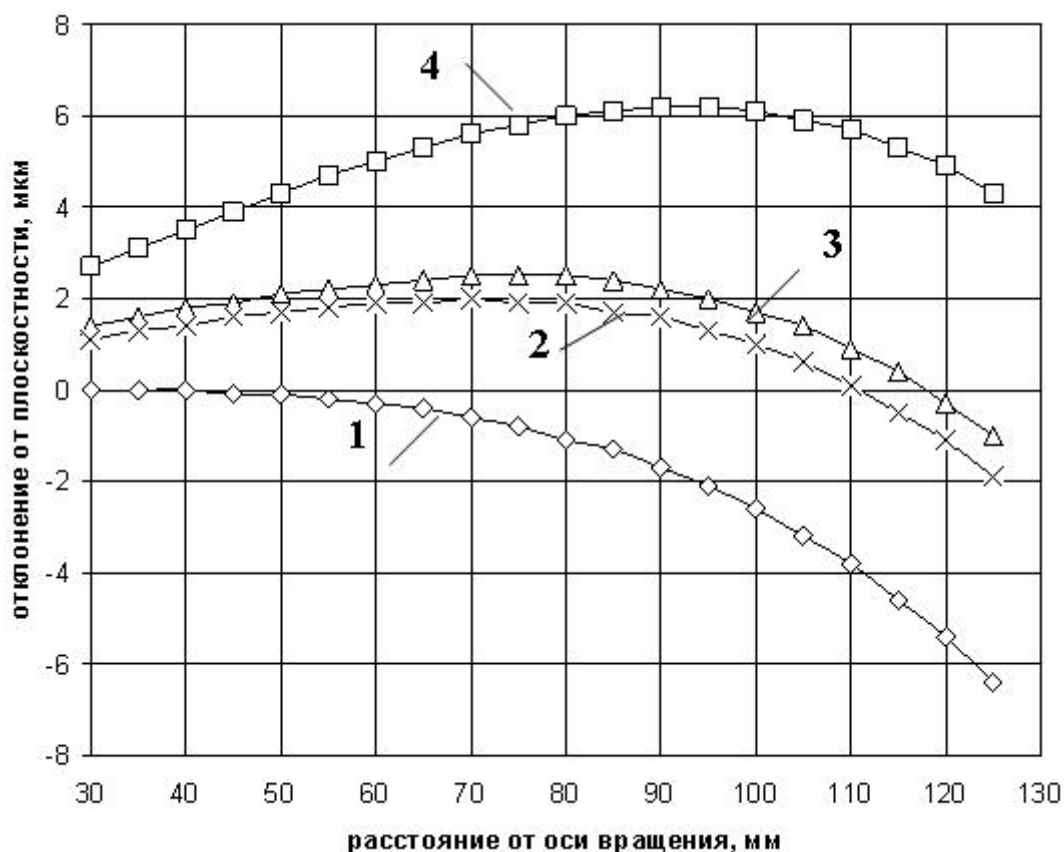


Рис. 13.3. Отклонение от плоскостности при точении торца при различной степени сбалансированности перед началом резания:

1 – полная балансировка, 2 – балансировка на 50%, 3 – балансировка на 38%, 4 – без балансировки

Аналогично формируется и математическая [модель](#) для анализа [отклонения формы](#) обработанной поверхности при наружном [точении](#) особо точных цилиндрических изделий – валков полиграфических и бумагоделательных машин и т.п. Относительные колебания, возникающие вследствие постепенного изменения дебалансной массы за счет срезания исходного эксцентриситета заготовки, должны в этом случае рассматриваться в радиальном направлении. Анализ показывает, что в зависимости от степени сбалансированности полученная поверхность имеет отклонения от цилиндричности в виде прямого или обратного конуса, бочкообразности, а также их сочетания.

Снижение вредного воздействия [колебаний](#), передающихся в зону обработки через фундаменты станков, всегда было важной задачей, но особенно актуальной стало при переходе из микрометрового в нанометровый диапазон точности изготовления деталей.

Традиционным способом виброизоляции станка было устройство отдельного монолитного фундамента большой массы. Однако реализация данного подхода связана с большими затратами и, наряду с низкой эффективностью виброизоляции, не может быть использована на современных предприятиях.

В настоящее время для установки оборудования используются различные виброизолирующие опоры, которые могут быть как нерегулируемыми, так и регулируемыми, т.е. иметь возможность изменения [жесткости](#) для настройки. В ответственных случаях применяют пневмоопоры, к достоинствам которых относят низкую резонансную частоту (порядка нескольких Гц).

ЛЕКЦИЯ 14

Моделирование и теоретический анализ относительных колебаний инструмента и заготовки

Процесс резания всегда сопровождается тем или иным уровнем относительных колебаний режущего клина и обрабатываемой поверхности.

Рассмотрим контакт по задней грани с учетом величины упругого восстановления обработанной поверхности, а также кинематических изменений углов и толщины среза, происходящих вследствие относительных колебаний [резца](#) и заготовки. Выше в разделе 11 была показана схема формирования контакта при отсутствии колебаний и приведена формула (11.1) для расчета длины контакта. При относительных колебаниях резца и заготовки величины, входящие в формулу (11.1), в течение периода колебаний изменяются, так как действительные задний угол, угол резания и толщина среза зависят от колебательной скорости и колебательного смещения и колебательной составляющей контактного [давления](#). Таким образом, можно записать расчетную формулу для анализа изменения контакта по задней грани, вызываемого изменениями кинематического заднего угла в процессе [колебаний](#):

$$d = p + h_z + 9,59 \cdot \frac{a^{0,523} \cdot \delta^{0,75} \cdot V^{0,304}}{E \cdot \sin \alpha} \quad (14.1)$$

В качестве примера проследим, как изменяется составляющая величины контакта, определяемая упругим восстановлением, в течение периода колебаний ([рис. 14.1](#)). Два первых слагаемых в формуле практически не изменяются. Переменная составляющая контакта меняется весьма неравномерно: на участке колебательного врезания контакт в начале резко увеличивается, затем так же резко падает, но на участке колебательного выхода режущего клина из заготовки протяженность контакта плавно уменьшается. Это объясняется быстрым изменением функции арктангенса при малых углах, а также изменением максимального контактного давления в пределах 1000...1800 Н/мм².

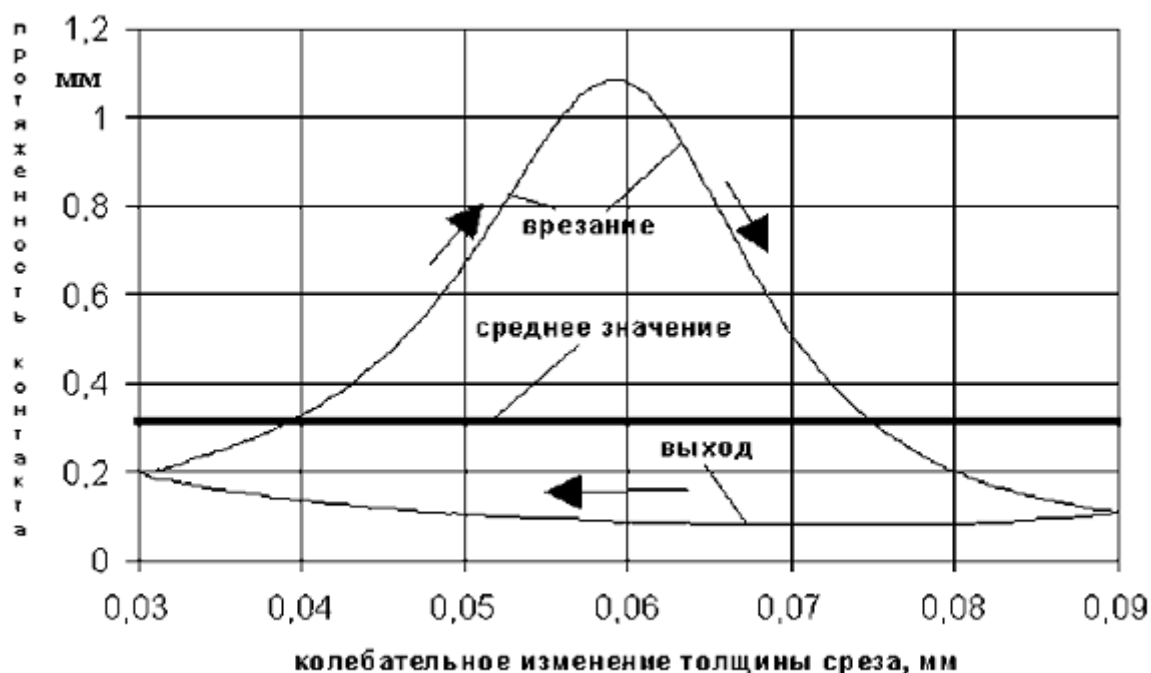


Рис. 14.1. Изменение протяженности контакта задней грани резца с обработанной поверхностью заготовки

Расчеты произведены при следующих параметрах: материал – сталь 12ХН3А, средняя толщина среза (т.е. при отсутствии колебаний) – 0,06 мм, задний угол – 7° , угол резания – 80° , амплитуда колебаний – 0,03 мм, [частота](#) колебаний – 560 Гц.

Так как пиковые значения h в течение периода колебаний непродолжительны (около 0,08...0,1 периода), по-видимому, целесообразно при расчетах использовать усредненные по периоду значения h . Пример зависимости $h_{\text{ср}}$ от частоты при различных амплитудах колебаний показан на [рис. 14.2...14.5](#). Кривые построены в диапазонах частот, при которых в данных условиях действительный задний угол не достигает отрицательной величины. Подобные значения h и рекомендуется использовать при компьютерном анализе амплитудной фазово-частотной характеристики процесса [резания](#).

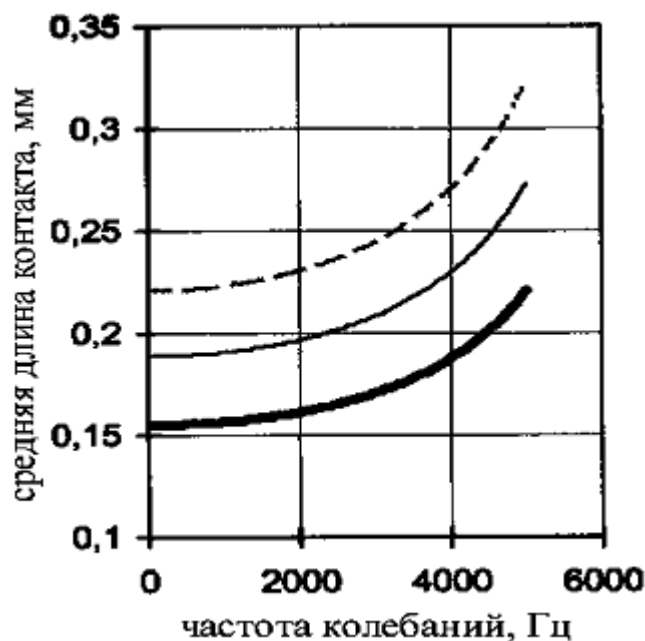


Рис. 14.2. Зависимость средней за период колебаний длины контакта по задней грани от частоты колебаний при угле резания: 100° – (

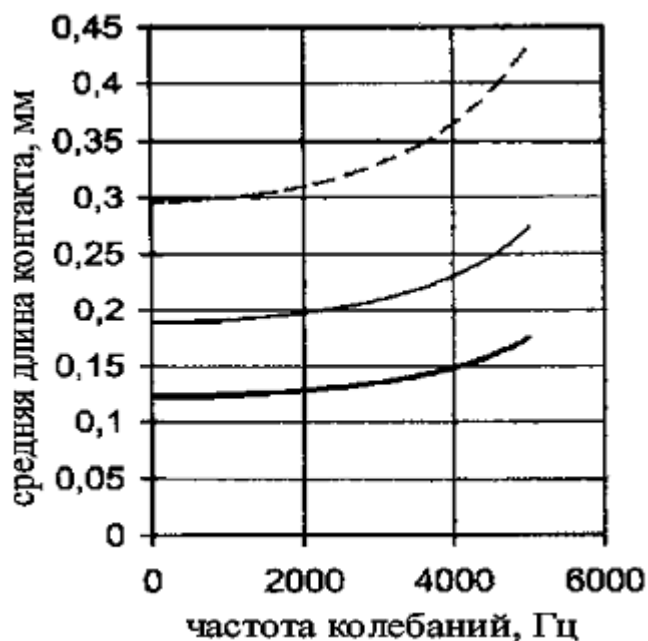


Рис. 14.3. Зависимость средней за период колебаний длины контакта по задней грани от частоты колебаний при толщине среза: 0,5 мм

-----), 80° – (—) и 60° – (—)

– (-----), 0,2 мм – (—) и 0,08 мм – (—)

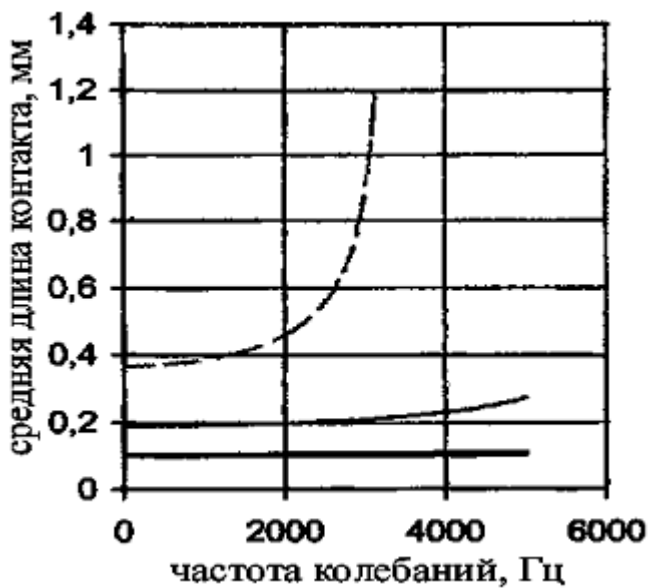


Рис. 14.4. Зависимость средней за период колебаний длины контакта по задней грани от частоты при задних углах: 3° – (-----), 6° – (—) и 12° – (—)

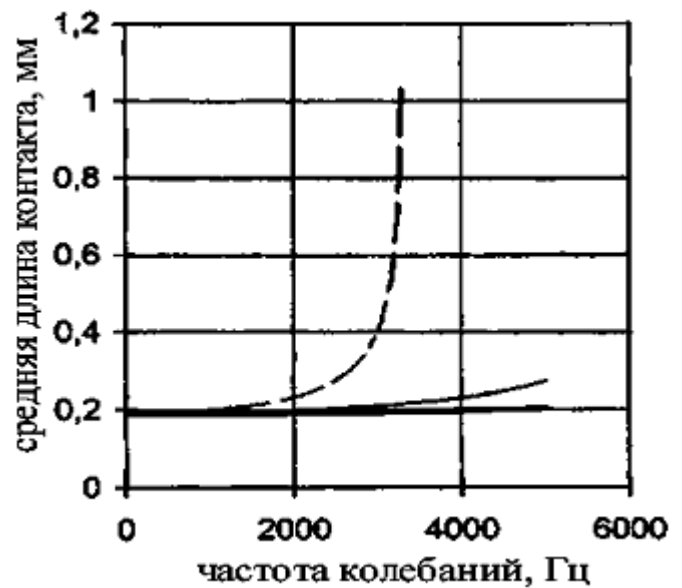


Рис. 14.5. Зависимость средней за период колебаний длины контакта по задней грани от частоты при скоростях резания: 0,5 м/с – (-----), 1 м/с – (—) и 2 м/с – (—)

Рассмотрим случай системы с одной степенью свободы при наличии линейной восстанавливающей силы и [трения](#), когда кроме силы упругости, возникающей в пружине при растяжении, и силы сопротивления, имеется вертикальная вынуждающая сила, приложенная извне к колеблющейся массе, изменяющаяся по гармоническому закону ([см. рис. 14.6](#)).

В случае вынужденных [колебаний](#) дифференциальное уравнение движения имеет вид:

$$m\ddot{q} + b\dot{q} + cq = H \sin \omega t \quad (14.2)$$

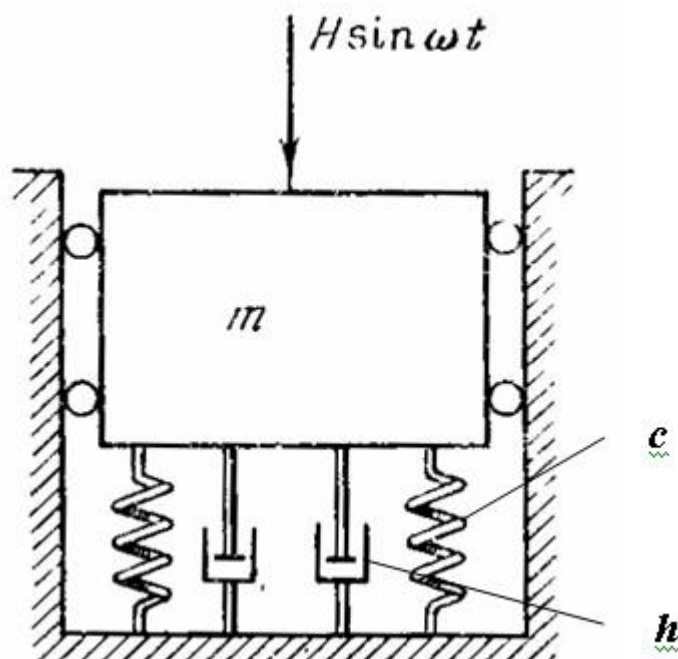


Рис. 14.6. Вынужденные колебания в системе с трением и демпфированием

Вводя обозначения

$$h = b/2m, \quad k^2 = c/m,$$

приходим к уравнению в следующей форме:

$$\ddot{q} + 2h\dot{q} + k^2q = \frac{H}{m} \sin \omega t \quad (14.3)$$

Его общее решение имеет вид

$$q = e^{-ht} (C_1 \sin k_* t + C_2 \cos k_* t) + \frac{H}{a \sqrt{(k^2 - \omega^2)^2 + 4h^2 \omega^2}} \sin(\omega t - \gamma) \quad (14.4)$$

где

$$k_* = \sqrt{k^2 - h^2} \quad (14.5)$$

есть частота затухающих [колебаний](#) системы, а угол γ , характеризующий отставание фазы перемещения от фазы силы, определяется выражением

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{2h\omega}{k^2 - \omega^2}; \quad (14.6)$$

постоянные C_1 и C_2 находятся из начальных условий. Первая часть полученного решения представляет собой колебания с [частотой](#) k_* , которые с течением времени затухают и вскоре после начала процесса становятся практически несущественными.

Основное значение имеет вторая часть общего решения:

$$q = \frac{H}{a \sqrt{(k^2 - \omega^2)^2 + 4h^2 \omega^2}} \sin(\omega t - \gamma) \quad (14.7)$$

описывающая незатухающие установившиеся колебания, происходящие с частотой возбуждения.

Постепенное установление стационарного колебательного процесса с частотой ω иллюстрировано на [рис. 14.7](#). для трех случаев. В первом случае ([рис. 14.7 а](#)), когда $\omega \ll k$, в начале движения основные колебания частоты ω сопровождаются затухающими колебаниями большей частоты. В противоположном случае, когда $\omega \gg k$ ([рис. 14.7 б](#)) на основные колебания с частотой ω накладываются затухающие колебания с меньшей частотой k . Наконец, при близких значениях частот k и ω движение носит характер биений, которые постепенно затухают ([рис. 14.7 в](#)).

Амплитуда установившихся [колебаний](#) определяется выражением

$$A = \frac{H}{a \sqrt{(k^2 - \omega^2)^2 + 4h^2 \omega^2}} = \frac{H}{c \sqrt{(1 - \frac{\omega^2}{k^2})^2 + \frac{4h^2 \omega^2}{k^2}}} \quad (14.8)$$

Отношение амплитуды A к статическому перемещению $q_{ст} = H/c$ равно

$$\mu = \frac{A}{q_{ст}}, \quad (14.9)$$

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{(1 - \frac{\omega^2}{k^2})^2 + \frac{4h^2 \omega^2}{k^2}}} \quad (14.10)$$

и представляет собой коэффициент динамичности. Резонансные значения динамического коэффициента обычно определяют при $\omega = k$ по выражению

$$\mu_{\text{рез}} = \frac{k}{2h} \quad (14.11)$$

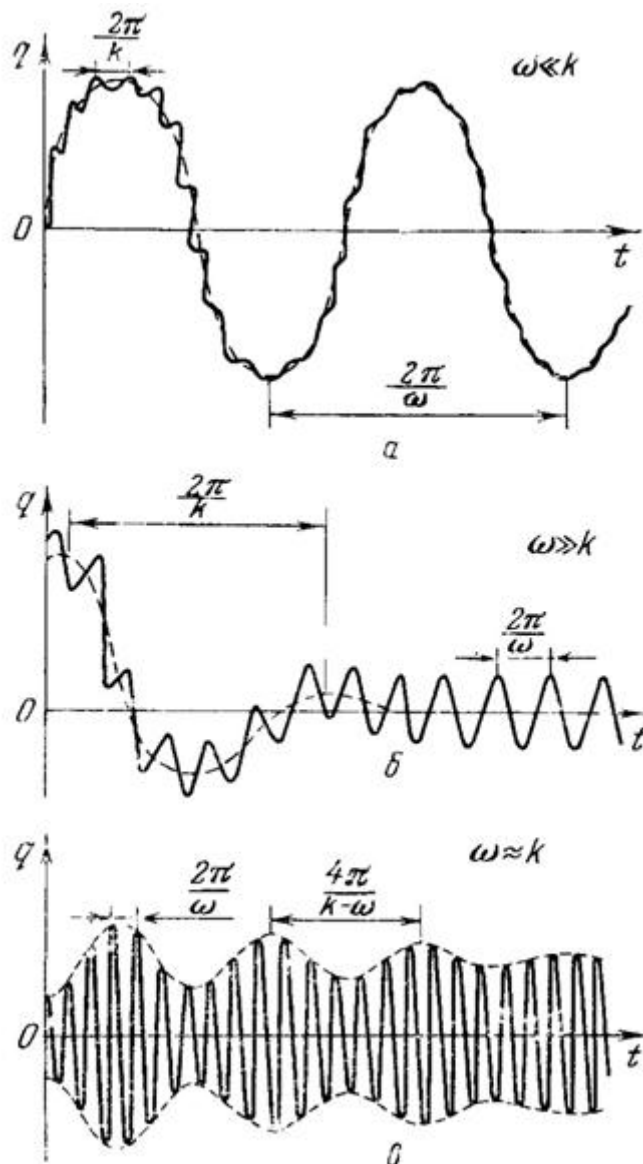


Рис. 14.7. Установление стационарного колебательного процесса

Иногда резонансное значение коэффициента динамичности называют добротностью системы: чем больше добротность, тем острее резонансный пик.

Рассмотрим случай, когда переменная сила с амплитудой P действует на тело массы m , опертное на пружину и демпфер (C – коэффициент жесткости

пружины, h – коэффициент вязкости демпфера) ([рис. 14.8](#)).

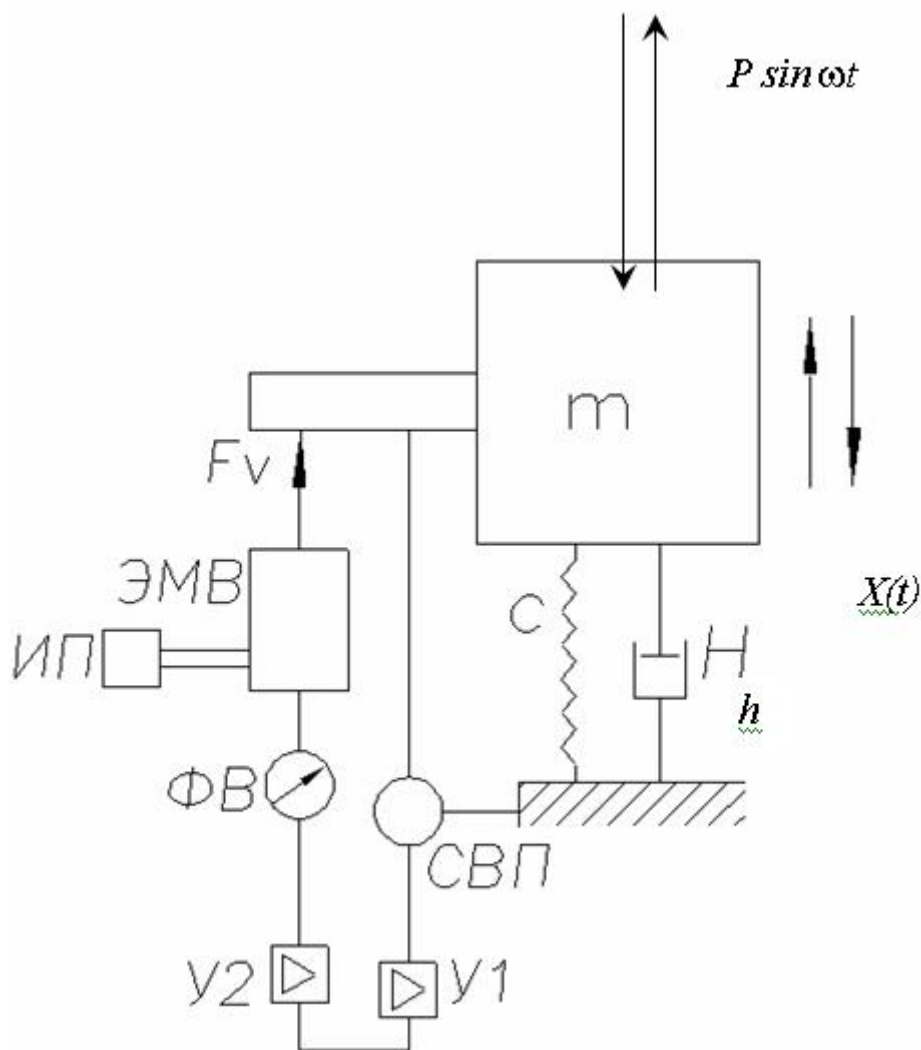


Рис. 14.8. Принципиальная схема замкнутой системы гашения колебаний для произвольной системы с одной степенью свободы

Колеблющаяся масса снабжена системой активного гашения колебаний с помощью электромагнитного вибратора (ЭМВ). Система включает источник питания (ИП), фазовращатель (ФВ), усилитель постоянного тока (У1), усилитель переменного тока (У2) и датчик относительного перемещения (СВП – световолоконный преобразователь перемещений), разработанный на кафедре технологии машиностроения, металлорежущих станков и инструментов РУДН. Сигнал от этого датчика поступает на усилитель сигнала У1, далее на усилитель мощности У2 и на фазовращатель ФВ. От фазовращателя сигнал поступает на бесконтактный электромагнитный вибратор с внешним якорем, который компенсирует колебания с учетом угла φ , характеризующего отставание фазы перемещения от фазы силы.

Для проведения компьютерного исследования полученной [модели](#) нужно решить систему уравнений, включающую в себя дифференциальные уравнения второго порядка. Аналитическое решение этих уравнений представляется затруднительным, поэтому следует воспользоваться численными методами решения дифференциальных уравнений, позволяющими получить приближенное решение задачи с заданным порядком точности.

В основу был положен численный метод решения дифференциальных уравнений Рунге-Кутты четвертого порядка точности, реализованный программным способом. Метод Рунге-Кутты позволяет решать системы обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) первого порядка. Метод можно применять и для решения дифференциальных уравнений высшего (второго и т.д.) порядка, т.к. они могут быть представлены системой дифференциальных уравнений первого порядка. Для этого следует произвести замену:

$$\dot{x} = y_2,$$

$$\dot{y}_1 = y_2,$$

в результате которой получим систему уравнений:

$$\begin{aligned} m \ddot{y}_1 + h \dot{y}_1 + c y_2 &= H \sin \omega t, \\ y_1 &= y_2. \end{aligned} \quad (14.12)$$

Наиболее употребительным методом решения уравнения первого порядка $y' = F(x, y)$ является метод Рунге-Кутты четвертого порядка, блок-схема которого показана на [рис. 14.9](#).

Вычисления производятся по формуле:

$$y^{k+1} = y^k + (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)/6, \quad (14.13)$$

где:

$$k_1 = F_k h = F(x_k, y_k)h$$

$$k_2 = F(x_k + h/2, y_k + k_1/2)h$$

$$k_3 = F(x_k + h/2, y_k + k_2/2)h$$

$$k_4 = F(x_k + h, y_k + k_3)h,$$

$$k = 0, \dots, n-1,$$

$$h = (x_f - x_0)/n,$$

n – количество шагов интегрирования.

Система уравнений (14.12) решалась для значений $H = 99000$ Н/сек, $c = 44400000$ Н/м, $m = 50$ кг, $d = 5 \cdot 10^{-3}$ кг (масса дисбаланса), $\omega = 314$ рад/с.

Тестирование программы осуществлялось путем введения обратной связи синусоидального импульса силы, сдвинутого относительно [колебаний](#) массы по фазе на угол π , исходя из того, что сила электромагнитного вибратора должна находиться в противофазе к вынуждающей силе. Результаты показали, что введения фазового вращения на целое число π недостаточно для удовлетворительной компенсации колебаний. Это объясняется тем, что из-за [демпфирования](#) колебаний вектор перемещения отстает от вектора силы. Поэтому при последующих компьютерных испытаниях была введена корректировка, представляющая собой добавление фазового сдвига.

В компьютерном эксперименте было выяснено, что в динамической системе, представленной на [рис. 14.8](#), наиболее подходящее приближенное значение фазового сдвига, обеспечивающее максимальный уровень гашения колебаний, равно $\pi + 0,0375$ ([рис. 14.10](#)).

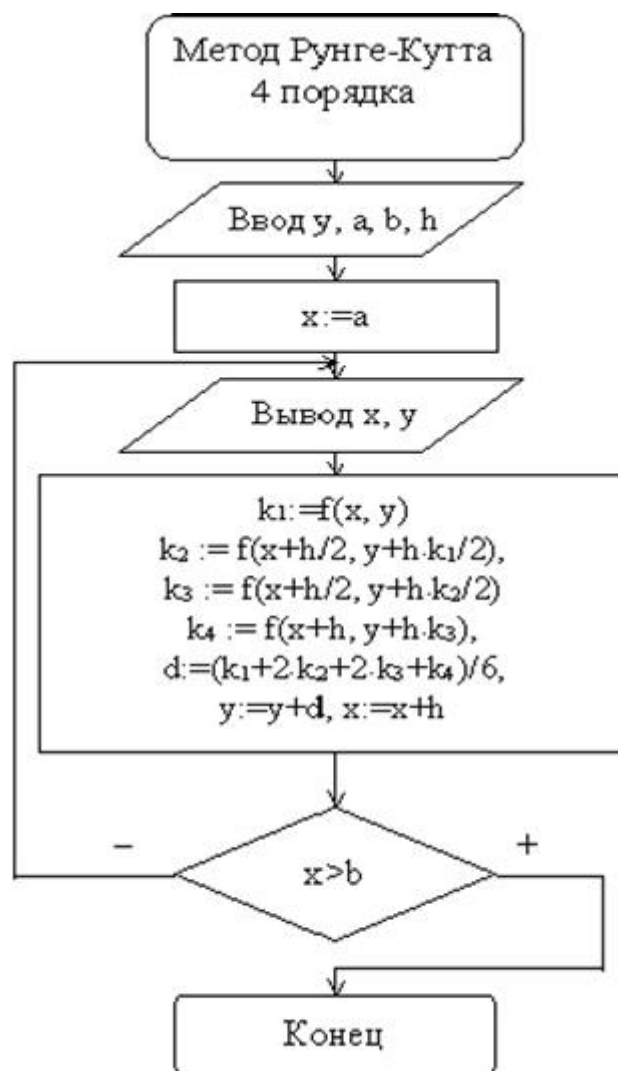


Рис. 14.9. Блок-схема метода Рунге-Кутты четвертого порядка

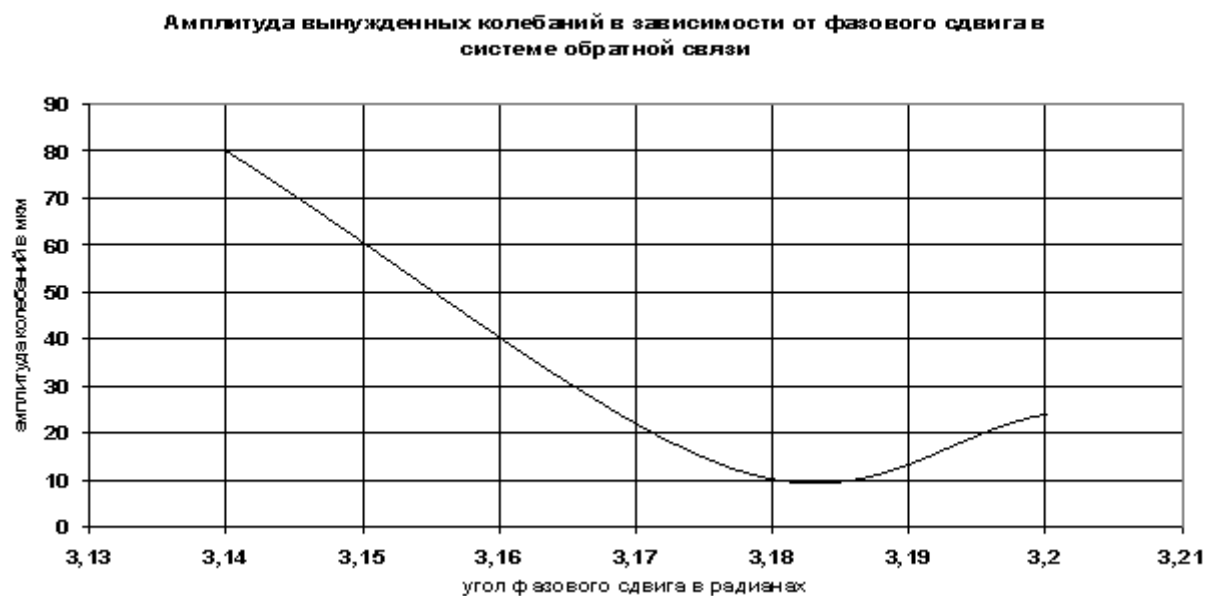


Рис. 14.10. Влияние угла фазового сдвига в системе обратной связи на амплитуду вынужденных колебаний

Частота колебаний - количественная характеристика периодического колебательного процесса, равная числу полных колебаний, совершаемых в единицу времени. Частота колебаний:
- обратно пропорциональна периоду колебаний;
- измеряется в герцах.

ЛЕКЦИЯ 15

Пассивная и активная балансировка вращающихся деталей

Шпиндель является основным источником [колебаний](#) в процессе резания на ОТТС, его статическая и динамическая неуравновешенность влияет на колебания механизма [подачи](#), который в этих станках состоит из многих деталей, разъединенных неподвижными и подвижными стыками.

Теоретические вопросы колебаний жестких [роторов](#), в том числе и на аэростатических подшипниках, подробно рассмотрены в литературе. Однако жесткие требования к точности формы и шероховатости поверхностей, получаемых лезвийной обработкой на ОТТС, требуют конкретного знания динамических характеристик данного шпиндельного узла, так как от этого зависит качество [балансировки](#) и величина относительных колебаний резца и [заготовки](#). При установке на планшайбе шпинделя деталей различных масс и размеров изменяются приведенная масса и моменты инерции шпинделя, а также расстояние между центром жесткости и центром массы, что изменяет величины критических скоростей, коэффициент динамичности и демпфирование (тем самым и фазовый угол при балансировке). Поэтому необходимо на физической [модели](#) отработать методику определения характеристик шпиндельного узла в цеховых условиях (как для фиксации паспортных данных при приемочной процедуре готового станка, так и при периодическом контроле во время его эксплуатации).

Обработка [точением](#) на ОТТС проводится с частотами вращения от 50 до 20 в секунду на выбеге, то есть, по крайней мере, в 4,5 раза меньшими, чем собственные частоты на второй гармонике. Расчеты показывают, что влияние угловых колебаний на радиальные в диапазоне рабочих частот вращения не выходит за пределы четвертой значащей цифры, то есть практического значения не имеет. Это открывает возможности использовать новый метод расчета и построения [АФЧХ](#) шпинделя ОТТС, а именно испытания с помощью известной дебалансной массы с последующей компьютерной обработкой.

Для реализации способа достаточно ([рис. 15.1](#)) установить один бесконтактный [датчик](#) относительных [колебаний](#) и цифровой вольтметр. Шпиндель разгоняется до максимальной частоты вращения, затем привод выключается и на выбеге производится измерение сигнала датчика, по крайней мере, на трех фиксированных [частотах](#). Это реализуется применением трех острорезонансных фильтров, причем желательно выбрать частоты поближе к максимальной, но с разницей настройки примерно в 10 Гц (например, 48, 38 и 28 Гц). Затем в кольцевой балансировочный паз вставляют груз 3 известной массы, величину которой выбирают достаточным для получения отчетливого сигнала относительных колебаний, но не допуская выхода колебаний системы "шпиндель-втулка" за пределы линейности (то есть не более, чем 4,5 мкм – для наших исследований это составляло 7 г). Место установки груза (I) отмечаем как нулевое, проводим снова процедуру разгона шпинделя до максимальной частоты, выключение привода и запись сигналов на тех же фиксированных частотах. Затормозив [ротор](#), переставляем тот же груз в положение (П), диаметрально противоположное предыдущему пуску, и снова проводим аналогичные действия (запись на выбеге трех сигналов). В результате получаем 9 значений относительных колебаний, которые обозначим следующим образом:

$R_{1,1}, R_{1,2}, R_{1,3}$ – пуск без дебалансного груза,

$R_{2,1}, R_{2,2}, R_{2,3}$ – пуск с грузом в точке 00,

$R_{3,1}, R_{3,2}, R_{3,3}$ – пуск с грузом в точке 1800.

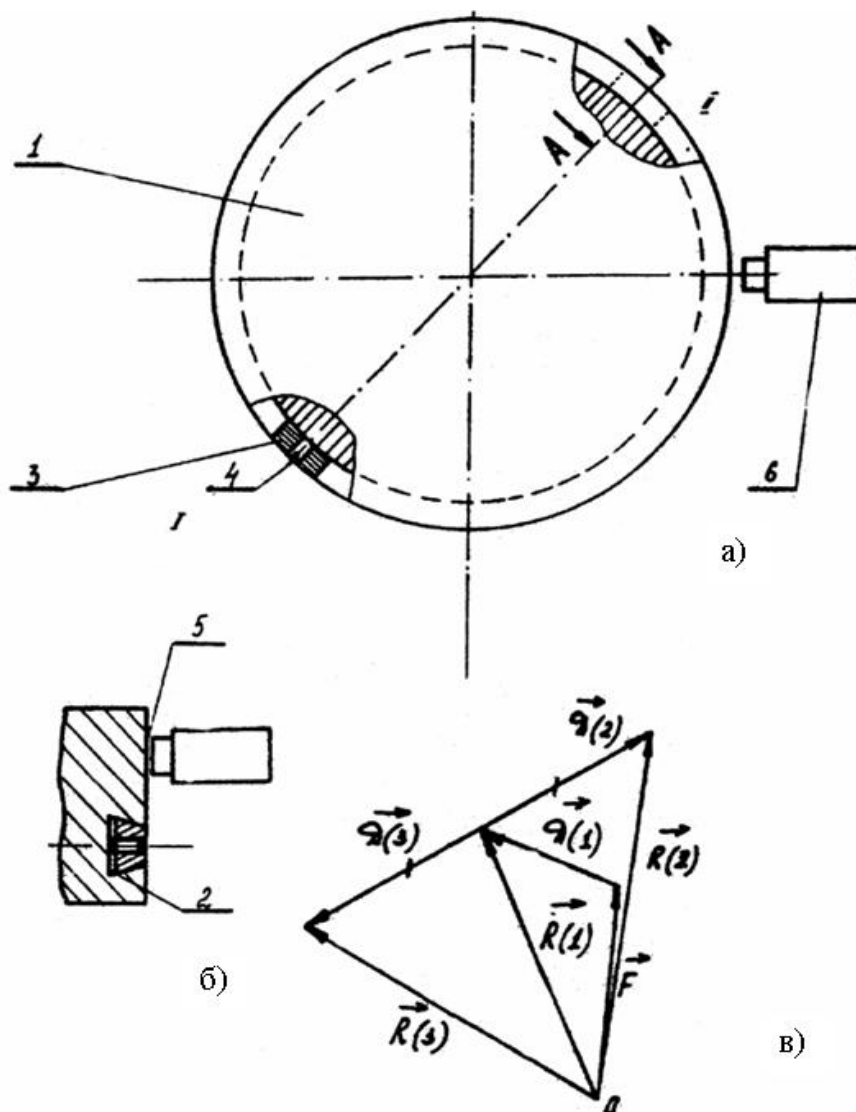


Рис. 15.1. К способу динамических испытаний быстроходных жестких роторов:

а) – исходная (I) и повторная (II) установки тарировочного груза; б) – взаимное расположение балансирующих грузов и световолоконного измерителя относительных колебаний; в) – векторная диаграмма для составления расчетной системы уравнений

Рассмотрим векторную диаграмму перемещений шпинделя для какой-нибудь из трех фиксированных частот, обозначенной индексом j (рис. 15.1 в). Модуль вектора перемещений, вызванных центробежной силой грузов, установленных в нулевом и диаметрально противоположных положениях, для каждой из фиксированных частот может быть вычислен по известной формуле, связывающей величины сторон и медиану косоугольного треугольника:

$$D_{2,j} = D_{3,j} = (0,5 \cdot R_{2,j}^2 + 0,5 \cdot R_{3,j}^2 - R_{1,j}^2)^{0,5}, \quad (15.1)$$

где: j – индекс, соответствующий одной из трех фиксированных частот,

$D_{2,j}$ и $D_{3,j}$ – модули векторов перемещений, вызванных центробежными силами дебалансных грузов на указанных частотах.

Воспользовавшись известными формулами теории колебаний для вынужденных колебаний с демпфированием, выразим модули векторов перемещений в следующем виде:

$$D_j = \frac{m_T \cdot \omega_j^2 \cdot R}{M \sqrt{(\omega_0^2 - \omega_j^2)^2 + (\lambda/\pi)^2 \cdot \omega_j^2}}, \quad (15.2)$$

где: D_j – амплитуда [колебаний](#) на j -ой частоте, мВ,

ω_0 – собственная частота колебаний, Гц,

ω_j – частота фиксирования амплитуды, Гц,

M – приведенная масса шпинделя, кг,

$(m_T \cdot \omega_j^2 \cdot R)$ – амплитуда возбуждающей силы (m_T – масса тарировочного груза,

R – расстояние центра массы тарировочного груза от оси вращения, м,

λ – логарифмический декремент колебаний.

Произведем почленное деление выражений, используя индексы $j = 1, 2$ и 3 , и возведем в квадрат левые и правые части полученных результатов:

$$\frac{D_1^2}{D_2^2} = \frac{((\omega_0^2 - \omega_2^2)^2 + (\lambda/\pi)^2 \cdot \omega_2^2) \cdot \omega_1^4}{((\omega_0^2 - \omega_1^2)^2 + (\lambda/\pi)^2 \cdot \omega_1^2) \cdot \omega_2^4},$$

$$\frac{D_1^2}{D_3^2} = \frac{((\omega_0^2 - \omega_3^2)^2 + (\lambda/\pi)^2 \cdot \omega_3^2) \cdot \omega_1^4}{((\omega_0^2 - \omega_1^2)^2 + (\lambda/\pi)^2 \cdot \omega_1^2) \cdot \omega_3^4}.$$
(15.3)

В системе (15.3) неизвестны две величины: собственная частота колебаний шпинделя ω_0 и логарифмический декремент колебаний λ . Величины ω_1, ω_2 и $\omega_3 \in$ определяются по результатам тарировки резонансных фильтров, а D_1, D_2 и D_3 вычисляются по формулам (15.2) по экспериментальным данным, причем размерность этих данных (мкм, мВ или др.) не имеет значения, так как левые части уравнений безразмерны. Система (15.3) может быть представлена в виде

$$\begin{cases} (x_1 - a)^2 - d_2(x_1 - b)^2 + (w_1 - d_2 w_2)x_1 x_2 = 0, \\ (x_1 - a)^2 - d_3(x_1 - c)^2 + (w_1 - d_3 w_3)x_1 x_2 = 0, \end{cases}$$
(15.4)

$$x_1 = \omega_0^2, \quad x_2 = \lambda^2,$$

$$a = \omega_1^2, \quad b = \omega_2^2, \quad c = \omega_3^2,$$

$$w_1 = \left(\frac{\omega_1}{\pi}\right)^2, \quad w_2 = \left(\frac{\omega_2}{\pi}\right)^2, \quad w_3 = \left(\frac{\omega_3}{\pi}\right)^2,$$

$$d_2 = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2, \quad d_3 = \left(\frac{D_3}{D_1}\right)^2.$$

Система (15.4) представляет собой систему двух квадратных уравнений. Используя программы аналитических вычислений на компьютере, нетрудно получить ее точное решение. Однако вычисления с использованием системы Maple 6, показали, что аналитическое выражение решения имеет громоздкий вид. Поэтому представляется целесообразным использование численных методов. Для построения соответствующей разностной системы уравнений запишем систему уравнений (15.4) в общем виде:

$$f(x) = 0, \quad f = (f_1, f_2), \quad x = (x_1, x_2)$$
(15.5)

$$f_1 = (x_1 - a)^2 - d_2(x_1 - b)^2 + (w_1 - d_2 w_2)x_1 x_2,$$

$$f_2 = (x_1 - a)^2 - d_3(x_1 - c)^2 + (w_1 - d_3 w_3)x_1 x_2.$$

Теперь можно рассчитать на каждой из выбранных частот j три величины, необходимые для построения АФЧ:

- 1) амплитуду переменной силы, вызываемую дебалансным грузом массой m_d :

$$F_{dj} = 4 \cdot \pi^2 \cdot m_d \cdot \omega_j^2 \cdot R \quad [\text{Н}], (j = 1, 2, 3) \quad (15.6)$$

где: R – расстояние от центра массы дебалансного груза до оси вращения шпинделя в м,

ω_j – фиксированная частота измерения, Гц.

- 2) статическую податливость шпинделя, осредненную по трем расчетам:

$$x_0 = \frac{1}{3 \cdot \omega_0^2} \cdot \sum_{j=1}^3 x_j \cdot \sqrt{(\omega_0^2 - \omega_j^2)^2 + (\lambda/\pi)^2 \cdot \omega_0^2 \cdot \omega_j^2} \quad (15.7)$$

- 3) углы фазовых сдвигов:

$$\varphi_j = \arctg\left(\frac{(\lambda/\pi) \cdot \omega_j \cdot \omega_0}{\omega_0^2 - \omega_j^2}\right) \quad (15.8)$$

Примерная оценка эффективности предложенной методики такова: время проведения экспериментов сокращается в 30-40 раз, время обработки результатов и оформления отчета – в 5 раз, точность увеличивается на порядок. Однако необходимо помнить об ограничениях применения способа:

- он может быть использован для быстроходных шпинделей,
- динамическая система должна обладать слабой связанностью колебательных контуров и быть близка к линейной,
- регистрирующая аппаратура должна обеспечить четыре верные значащие цифры (при трех значащих цифрах ошибка может составить 3-4%).

АКТИВНЫЕ МЕТОДЫ БАЛАНСИРОВКИ РОТОРОВ (АБУ)

К активным методам балансировки относятся устройства с принудительным перемещением корректирующих масс или изменением массы ротора, а также устройства принудительного центрирования и силового воздействия на ротор.

Изменение положения корректирующих масс или их величины в активных АБУ осуществляется с помощью исполнительного механизма, управление которым производится вручную или по сигналам от датчиков вибрации или чувствительных элементов, указывающих наличие и положение дисбаланса. Такие АБУ обычно содержат еще регулятор перестройки системы управления на критической частоте вращения, благодаря которому балансировка выполняется как выше, так и ниже ее.

Активные АБУ управляются по методу случайного или направленного поиска необходимых положений корректирующих масс.

Случайный поиск не требует знания и учета динамических характеристик ротора и обеспечивает независимость работы АБУ от частоты его вращения. При этом система не требует регулятора переключения управления на критической частоте вращения, но содержит генератор случайных сигналов, вырабатывающий случайные команды для управления исполнительным механизмом с равной либо преимущественной вероятностью движения корректирующих масс в каждом направлении. Случайный поиск позволяет устранять вредное влияние не только дисбаланса, но и других факторов (трение, нагрев и т.п.). Однако система управления для случайного поиска сложна и требует применения коммутирующих устройств для передачи энергии и информации с неподвижных частей машины на вращающиеся. Практическую реализацию метода ограничивает также то обстоятельство, что время балансировки непостоянно и может превышать практически приемлемое. Не исключена также возможность временного возрастания дисбаланса на неопределенную величину.

Более надежной и производительной является балансировка роторов в работающей машине при помощи устройства с направленным перемещением корректирующих масс по заданным траекториям. В этих АБУ управление движением корректирующих масс выполняется с помощью следящих систем или

систем экстремального регулирования. Такие АБУ являются замкнутой системой автоматического регулирования непрямого действия с внешним источником питания. Работают АБУ со следящими системами за счет реагирования на рассогласование между входными (векторы дисбалансов корректирующих масс и чувствительных элементов) и выходными (вектор дисбаланса [ротора](#)) сигналами, что обеспечивает быстроедействие системы и точность балансировки. При этом не требуется измерять абсолютное значение дисбаланса ротора.

АБУ со следящей системой содержит чувствительный элемент, определяющий положение вектора дисбаланса с учетом динамических свойств вращающейся системы. Необходимые перемещения корректирующих масс обеспечивает механический или гидравлический исполнительный механизм.

Учет функциональной зависимости между частотой вращения, положением дисбаланса и отклонением, также устойчивое положение чувствительных элементов обеспечивают в этих АБУ направленное перемещение корректирующих масс в сторону уменьшения дисбаланса на всех [частотах](#) вращения. Эти устройства не содержат измерительной аппаратуры, расположены полностью на роторе, не требуют каналов передачи информации с ротора на неподвижные части машины и применимы для балансировки роторов в работающих машинах.

В группу активных АБУ входят также устройства, балансирующие ротор путем удаления материала при его вращении. Удаление материала производится различными методами: с помощью режущего [инструмента](#), искрообразования между ротором и электродом, химическим растворением или испарением металла, нагреваемого лазерным или электронным лучом.

Производительность балансировки механическим съемом материала ротора достаточно высокая, но точность невелика из-за наличия в устройстве подвижных элементов с присущими им зазорами в сочленениях, большой инерционности этих элементов, [износа](#) режущего инструмента, а также [деформаций ротора](#) при контакте с инструментом.

Физические методы балансировки (электроэрозионная, электрохимическая, электроннолучевая, лазерная) имеют небольшую производительность и высокую стоимость, но достигаемая при этом высокая точность оправдывает их применение в точном приборостроении.

Такие устройства применяются лишь при разовом уравнивании в специальных балансировочных станках, а не в работающей машине, так как это связано с существенным изменением ее конструкции. Количество снимаемого при балансировке материала имеет ограничение по условиям сохранения прочности и формы балансируемого изделия. Экологические требования обуславливают необходимость принятия специальных мер для исключения вредных выбросов в окружающую среду.

К активным относятся также устройства, работа которых основана на принудительном нанесении жидкого или пластического быстро затвердевающего балансировочного вещества, выбрасываемого различными способами из исполнительного органа устройства на «легкую» точку поверхности вращающегося неуравновешенного ротора. Выброс балансирующего вещества производится отдельными порциями по сигналам управляющего блока, вырабатываемым с учетом вибрации опор. Это совмещает во времени и автоматизирует операции измерения дисбаланса и его устранения с высокой производительностью и точностью независимо от опыта и квалификации оператора.

Эти АБУ можно применять как в специализированных балансировочных системах, так и устанавливать вблизи балансируемого ротора для устранения дисбаланса, образующегося в процессе работы. Стоимость таких устройств значительно ниже стоимости АБУ, применяющих физические методы балансировки, а их применение не требует в большинстве случаев существенной переделки машины.

В основу действия этих импульсных АБУ положено использование управляемой энергии взрыва тонкой проволоочки при коротком замыкании (ЭФБ), электрогидравлического эффекта (ЭГЭ), импульсного магнитного поля (ИМП), магнитострикционного эффекта (МСЭ) или энергии взрыва горючей смеси (ВГС).

К веществам, используемым в этих устройствах в качестве балансирующих, предъявляют ряд требований, главными из которых с учетом динамики процесса являются хорошие [адгезионные](#) свойства, быстрота затвердевания и отсутствие выделений вредных компонентов при затвердевании. При балансировке имеет значение состояние поверхности ротора, ее чистота и качество подготовки (обезжиривание, лужение и т.п.). Должны также учитываться эксплуатационные условия (температура, влажность, коррозионность среды и т.п.). Эти требования существенно ослабляются в случае балансировки абразивных кругов, когда поверхность круга не требует специальной подготовки, а в качестве балансирующей может использоваться охлаждающая эмульсия с введенными в нее утяжеляющими добавками.

Использование управляемой [энергии](#) электрогидравлического и магнитострикционного эффектов, импульсного магнитного поля позволяет наносить на вращающийся [ротор](#) малые порции балансирующего вещества с большой частотой, что дает возможность создать всережимное АБУ, выполнять

балансировку ротора во время изготовления и на ходу в процессе эксплуатации с высокой точностью и производительностью при полной автоматизации балансировки. АБУ с использованием взрыва горючей смеси в качестве источника энергии применяют в случаях, когда требуется нанесение больших порций корректирующих масс с невысокой частотой выбросов или при устранении дисбаланса на остановленном роторе, т.е. когда АБУ используется как инструмент устранения дисбаланса. Устройства, в которых балансировка реализуется путем взрыва проволоки, могут использоваться только в специальных [станках](#).

Анализ условий эксплуатации и обслуживания, конструктивных характеристик и учет динамических свойств неуравновешенной вращающейся системы позволяют сформулировать основные требования, которым должно отвечать идеальное АБУ:

Размеры корректирующих масс и самого АБУ должны обеспечивать полную компенсацию наибольшего дисбаланса, возникающего в машине.

На всех режимах работы машины АБУ не должно увеличивать ее дисбаланс.

Остаточный (неустраняемый) дисбаланс машины в результате действия АБУ не должен превышать допустимого значения.

АБУ должно обеспечивать многократную повторную [балансировку](#) ротора.

АБУ должно эффективно работать как при разгоне, так и при остановке ротора, учитывать положение его «тяжелой» точки на разных частотах вращения и обеспечивать безопасный переход машины через критические режимы.

АБУ должно иметь достаточную чувствительность к изменению дисбаланса в процессе работы и автоматически его компенсировать.

АБУ должно работать при любом положении оси балансируемого ротора в пространстве.

Конструкция АБУ должна быть простой, надежной в работе и легко обслуживаться.

Плоскость устранения дисбаланса в АБУ должна обеспечивать одновременное снижение реакций в опорах и напряжений в роторе.

При работе АБУ не должно быть вредных выбросов в окружающую среду.

Порядок расположения основных требований принят условно и не определяет степень их важности. Всем требованиям одновременно ни одно устройство отвечать не может. Поэтому, в зависимости от назначения и области применения АБУ, приобретают приоритет те требования, удовлетворение которых является основным. Кроме того, к некоторым АБУ могут предъявляться дополнительные требования.

ЛЕКЦИЯ 16

Методика особо точных измерений абсолютных и относительных колебаний: световолоконного, лазерного, вихретокового

Рассмотрим методику измерений на примере шпиндельного узла, изготовленного МСПО "Красный пролетарий". Он состоит ([рис. 16.1](#)) из собственно [ротора](#) катушечного типа, жестко связанного с ротором асинхронного двигателя. Диаметр цапфы – 150 мм, расстояние между опорами в осевом направлении – 75 мм, номинальные зазоры в аэростатическом подшипнике – 23,75 мкм. Узел был установлен на сварной раме, которая, в свою очередь, устанавливалась на виброизолирующих опорах. Поступательная и поворотная [жесткости](#) опор определялись в статике, поскольку предварительные расчеты показали, что можно предполагать линейный характер зависимости перемещений от нагрузки, поскольку смещение центра цапфы относительно центра подшипника, то есть так называемый относительный эксцентриситет, значительно меньше 0,2. Во всех статических и динамических экспериментах поддерживалось постоянное давление наддува $p = 0,4$ МПа.

Схема измерения показана на [рис. 16.2](#). При перемещении измерительной головки 5 по вертикали вдоль угольника 9 и изменении величины нагружающего радиального усилия от 20 до 170 Н были получены такие усредненные значения: коэффициент радиальной жесткости – $3,8 \cdot 10^7$ Н/м, угловой жесткости – $6,2 \cdot 10^5$ Нм/рад. Смещение центра массы системы "шпиндель-заготовка" относительно центра жесткости определялось расчетным путем (впоследствии эти результаты были подтверждены при динамических расчетах на ПК): для планшайбы без заготовки смещение составило 6 мкм, при установке заготовок массой 2,4; 15,3 и 24,8 кг – соответственно 2 мкм, 41 мкм и 62 мкм.

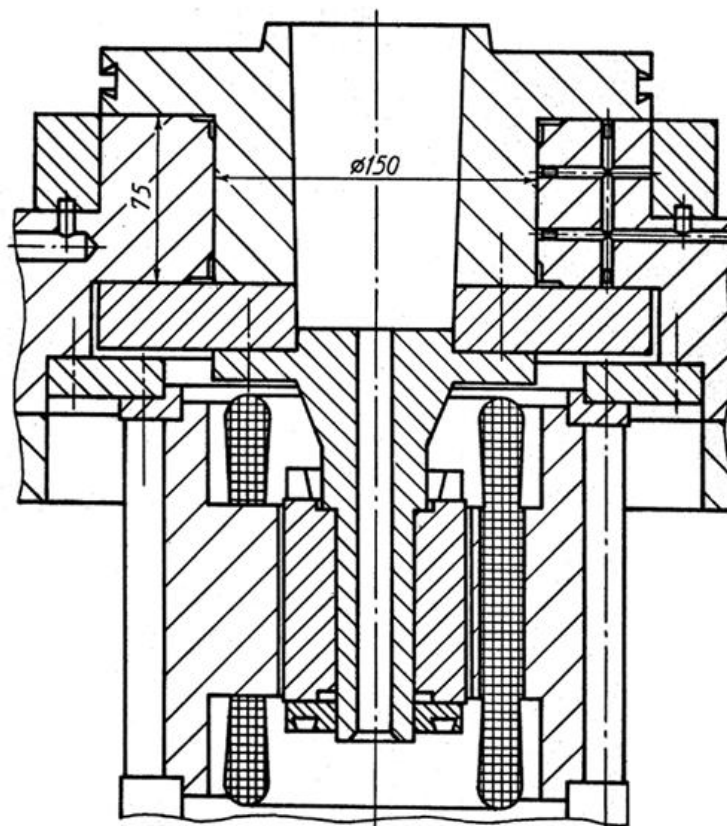


Рис. 16.1. Схема шпинделя на аэростатических опорах

Динамические эксперименты проводились путем кинематического возбуждения [колебаний](#) шпинделя ([рис. 16.3](#)). Для этого электродинамический вибратор 2 с якорем, отягощенным специальным грузом, устанавливался на приваренных к станине 1 стойках 4. Величина колебаний станины поддерживалась на заданном уровне (1 мкм) на всех исследуемых [частотах](#) постоянной с помощью усилителя мощности 7 и контролировалась акселерометром 12, сигнал которого дважды интегрировался усилителем 14.

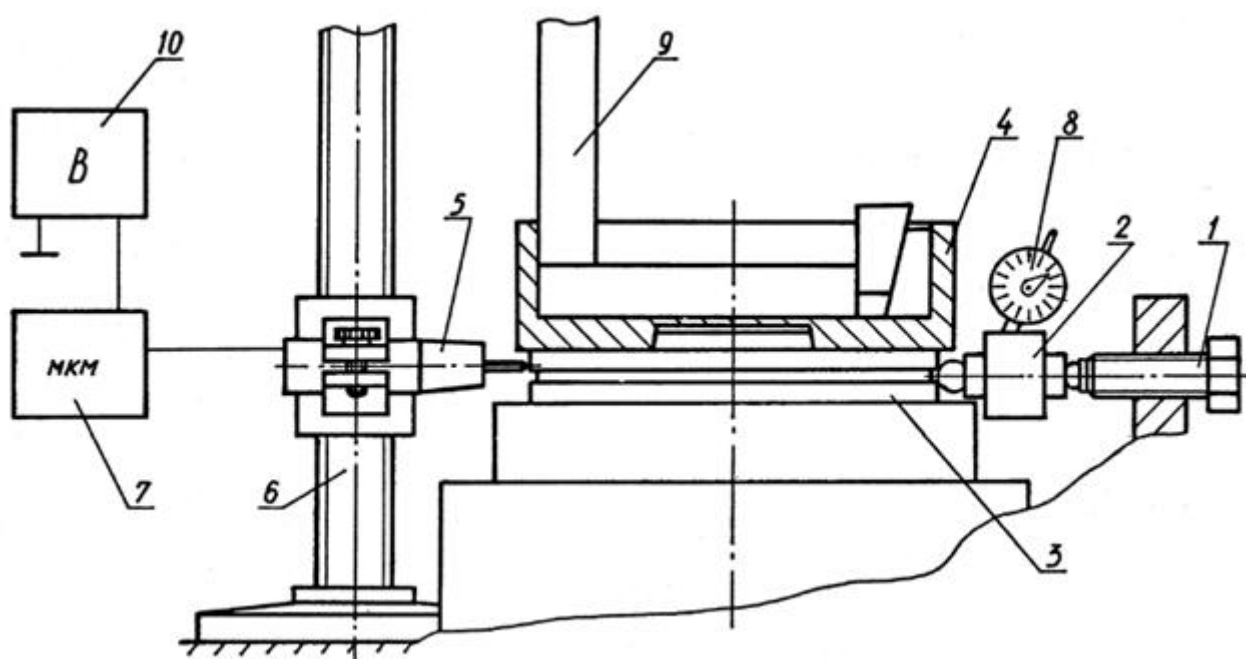


Рис. 16.2. Схема измерения статической жесткости шпинделя ОТТС

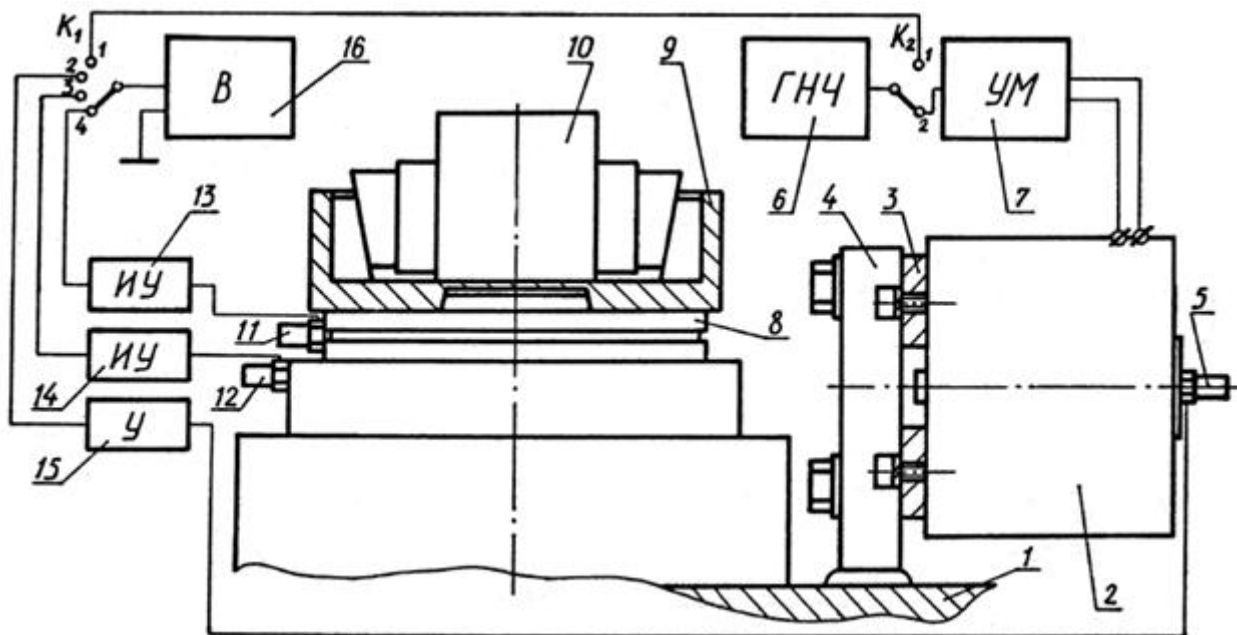


Рис. 16.3. Схема исследования динамических характеристик шпинделя

Пример АЧХ шпинделя с массой заготовки $m_3=2,4$ кг, построенной путем осреднения данных четырех экспериментов (рис. 16.4), показывает хорошее совпадение с теоретическими результатами: для резонансных частот радиальных колебаний соответственно 162 Гц и 161 Гц, для угловых колебаний – 231 Гц 227 Гц. По результатам экспериментов рассчитаны также коэффициенты динамичности на резонансных частотах: $K_{др} = 3,12$ для радиальных колебаний и $K_{д\omega} = 3,6$ – для угловых. Переходя к логарифмическим декрементам колебаний по известной формуле, получаем: $\delta_{рад} = 1,005$ и $\delta_{угл} = 0,873$.

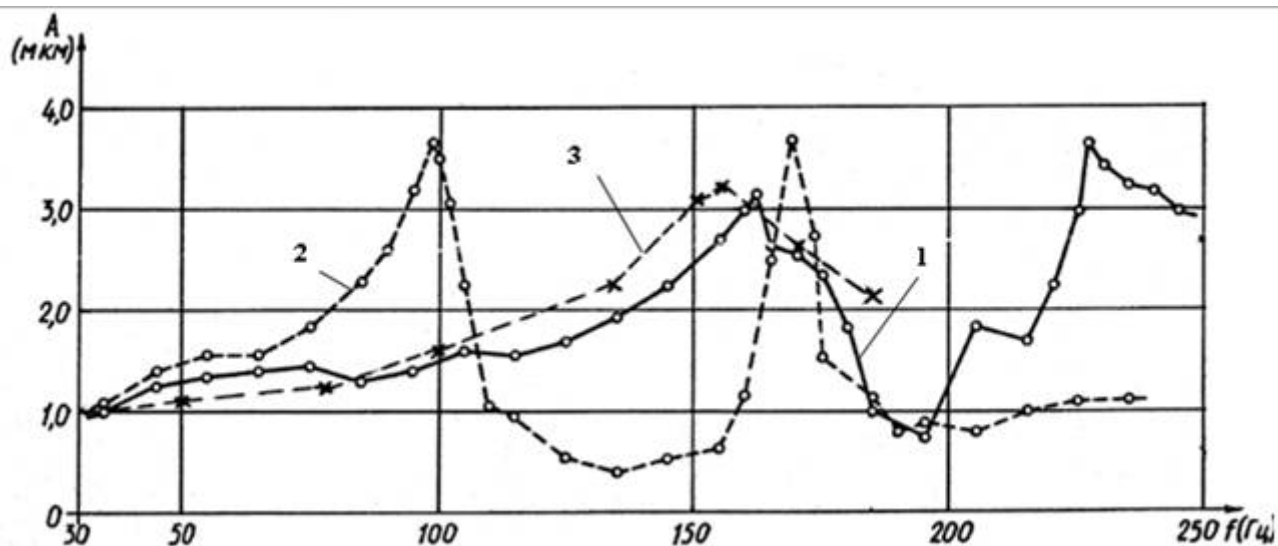


Рис. 16.4. Амплитудно-частотные характеристики шпинделя:

1 – $m_3 = 2,4$ кг (эксперимент); 2 – $m_3 = 24,8$ кг (эксперимент); 3 – $m_3 = 2,4$ кг (расчет на ПК)

Полученные данные также свидетельствуют о сравнительно малой связанности радиальных и угловых колебаний, что позволяет для данной конструкции шпинделей на аэростатических подшипниках значительно упростить расчеты и балансировку.

СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЙ ВЕЛИЧИНЫ И ФАЗОВОГО УГЛА ДИСБАЛАНСА В НАНОМЕТРИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ

Особенности конструкции и технических характеристик особо точного токарного станка (ОТТС) требуют разработки специальной оснастки и методики экспериментального исследования. Малые амплитуды [колебаний](#) холостого хода (при тщательной [балансировке](#) шпинделя они составляют от 0,02 до 0,05 мкм); сравнительно низкие доминирующие частоты колебаний в рабочем пространстве станка (от 10 до 600 Гц); аэростатические опоры и направляющие во всех подвижных соединениях деталей и узлов, примыкающих к рабочему пространству; большой перепад значений масс и жесткостей стыков (от 5 до 3000 кг и от $3 \cdot 10^7$ до $1,2 \cdot 10^8$ Н/м) – все это в совокупности определило необходимость конструирования, изготовления и отладки световолоконных датчиков относительных и абсолютных колебаний и пьезоэлектрического датчика силы, а также поиска новых подходов к балансировке и исследованию [АФЧХ](#) шпинделя с применением компьютера.

Сравнительный анализ показал, что существующие стандартные [датчики](#) не могут удовлетворить тем требованиям, которые накладываются особенностями экспериментальных исследований и эксплуатации особо точных станков по чувствительности и частотному диапазону. Поэтому была поставлена задача спроектировать, изготовить и испытать датчики малых перемещений на основе фотоэффекта. В световолоконном датчике микроперемещений ([рис. 16.5](#)) монохроматическое (инфракрасное, с длиной

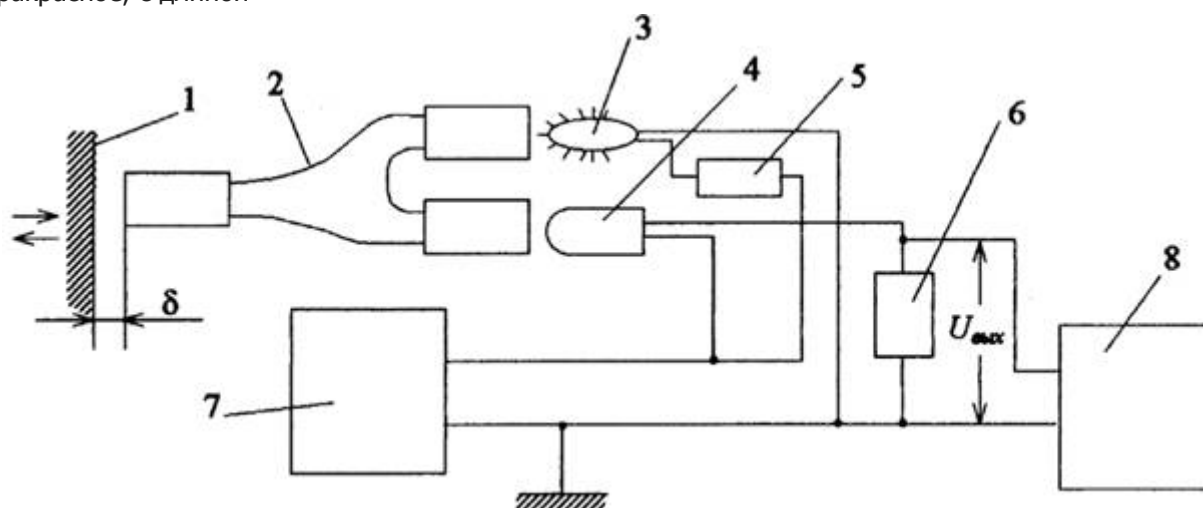


Рис. 16.5. Схема световолоконного датчика малых относительных перемещений

волны 1,07 мкм) излучение светодиода 3 по наружному жгуту 2 коаксиального световода падает на отражающую поверхность исследуемого объекта 1. Отраженная часть излучения по внутреннему жгуту 2 световода попадает на фотодиод 4, включенный в измерительную схему в режиме фоторезистора. Напряжение, снимаемое с нагрузочного резистора 6, поступает на вход милливольтметра 8. Питание схемы осуществляется от стабилизированного источника постоянного тока 7. Статические характеристики датчика ([рис. 16.6](#)) показывают, что можно подобрать соответствующий зазор между торцом световода и отражающей поверхностью, при котором будет наблюдаться максимальный градиент выходного напряжения и вместе с тем реализована линейность амплитудной характеристики датчика. Чувствительность датчика, то есть отношение величины выходного сигнала к изменению величины зазора, зависит от материала отражающей поверхности и ее качества и от величины сопротивления нагрузочного резистора. При увеличении сопротивления резистора чувствительность датчика растет, но уменьшается зазор между световодом и отражающей поверхностью, а также и линейный участок характеристики.

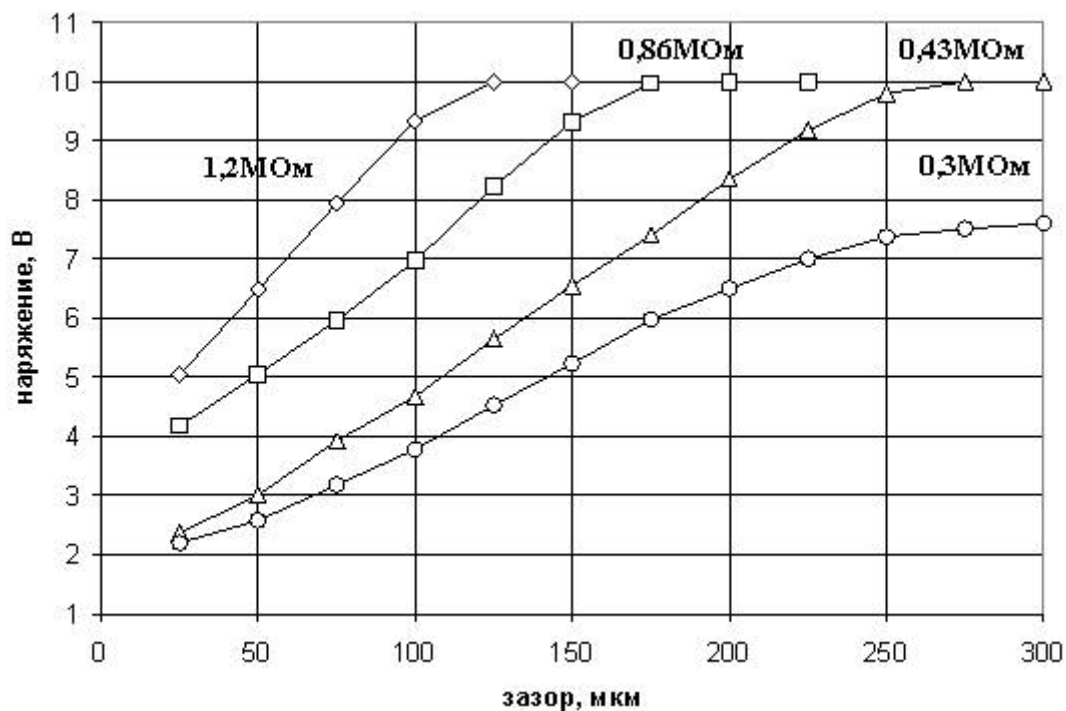


Рис. 16.6. Зависимость выходного напряжения световолоконного датчика от зазора между его торцом и отражающей поверхностью при различной величине нагрузочного сопротивления

Составной частью [датчика](#) является оптический разъем, который обеспечивает надежное концентрическое неподвижное соединение расщепленных концов световода с фотодиодом и светодиодом. В корпусе оптического разъема размещаются резисторы электрической схемы датчика ([рис. 16.7](#)). Концы световода фиксируются и зажимаются специальными цанговыми зажимами. Датчики перемещений опытной партии, изготовленной в лаборатории РУДН для МСПО «Красный пролетарий», имели чувствительность от 17 до 22 мВ/мкм и линейность [частотной](#) характеристики в диапазоне частот от 20 до 1000 Гц при [амплитудах](#) колебаний 0,01-10 мкм.

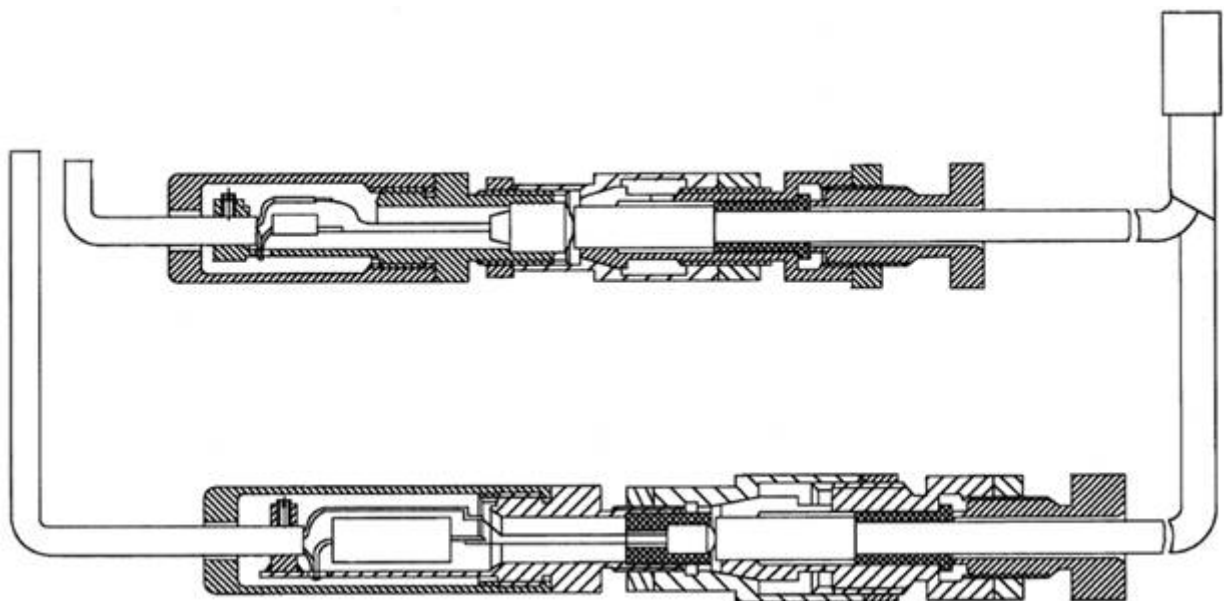


Рис. 16.7. Оптический разъем световолоконного датчика

При исследованиях особо точных станков и [балансировке](#) быстроходных [шпинделей](#) часто удобнее использовать датчики абсолютных колебаний – инерционные датчики (датчики сейсмического типа). Обычно с этой целью применяют акселерометры, однако серийно выпускаемые акселерометры с

соответствующим комплектом аппаратуры обеспечивают минимальный уровень уверенного измерения виброускорений до 10^{-3} м/с^2 , что на частоте 20 Гц позволяет фиксировать колебания с амплитудой не менее, чем 0,07 мкм. Эти параметры не удовлетворяют нашим требованиям, поэтому был разработан вибромметр с использованием в качестве измерительного узла [датчика](#) относительных [колебаний](#), описанного выше.

Световолоконный вибромметр ([рис. 16.8](#)) состоит из корпуса 1, в котором смонтирован узел регулирования зазора 2 с закрепленным в нем световодом 3. К корпусу 1 крепится болтами 4 светонепроницаемый кожух, состоящий из трех частей 5, 6, и 7, стянутых болтами 8. Между частями кожуха установлены плоские пружины 9, на которых подвешена инерционная масса 10, также состоящая из трех частей, стянутых болтами 11. Рабочая поверхность 12 массы 10, обращенная в сторону световода, имеет шероховатость не более длины волны инфракрасного излучения. Расстояние между поверхностью 12 и торцом световода регулируется с помощью винта 13 и пружины 15 и фиксируется стопорным винтом 14.

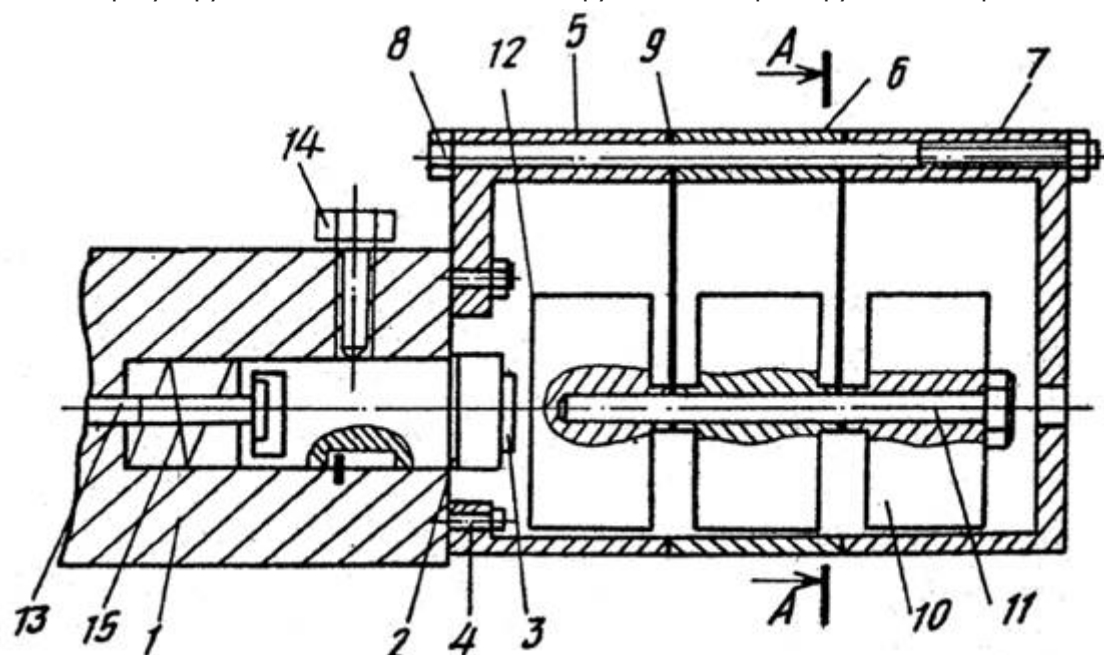


Рис. 16.8. Схема световолоконного вибромметра

Размещение массы 10 симметрично на двух плоских пружинах 9 обеспечивает ее плоскопараллельное движение, что сохраняет постоянную перпендикулярность поверхности 12 и оси световода 3. Механизм регулирования зазора позволяет установить и зафиксировать световод 3 в оптимальном положении, обеспечивающем наивысшую чувствительность. Образцы изготовленных датчиков имели чувствительность не менее 10 мВ/мкм в частотном диапазоне 22-200 Гц.

На основе изучения пространственных характеристик излучения светодиода и поглощения излучения фотодиодом было выдвинуто предположение, что при их определенном взаимном расположении относительное смещение может вызвать большой градиент электрического сигнала. Такое расположение было экспериментально найдено и реализовано в конструкции вибромметра, схема которого показана на [рис. 16.9](#).

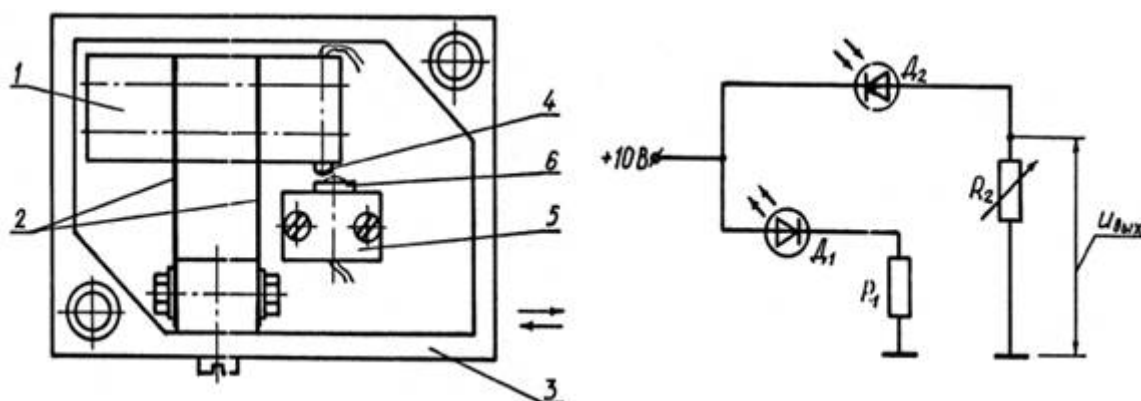


Рис. 16.9. Схема высокочувствительного вибромметра

Инерционная масса 1 закреплена на двух плоскопараллельных пружинах 2 в корпусе 3. В инерционной массе установлен светодиод 4. Фотодиод 6 установлен на платформе 5, которая выполнена с возможностью наладочного перемещения относительно корпуса для получения взаимного расположения светодиода и фотодиода, обеспечивающего максимальную чувствительность датчика. Испытания на вибростенде показали, что в диапазоне частот колебаний 20-1000 Гц датчик имеет линейную характеристику при чувствительности 29 мВ/мкм.

Структура (лат. structura - строение, расположение, порядок) - совокупность внутренних связей, строение, внутреннее устройство объекта. Иногда в определении понятия С. добавляют, что указанные внутренние связи устойчивы и что они обеспечивают целостность объекта и его тождественность самому себе. Подобное ограничение, по-видимому, излишне, так как в некоторых отраслях знания рассматриваются объекты с переменной, нестационарной и т.п. Понятие С. и родственные ему (такие, как связь, отношение, взаимодействие) играют важную роль в общей теории систем и при использовании системного подхода в различных областях деятельности; понятие С. тесно связано с понятием "функция".

ЛЕКЦИЯ 17

Датчики и измерительная аппаратура для нанометрического диапазона

Физика поверхностных явлений в настоящее время является одним из наиболее интенсивно развивающихся разделов науки. Именно на фундаментальных исследованиях в области физики поверхности твердого тела основаны успехи современных микро- и нанoeлектроники, гетерогенного катализа, космических технологий и т.п. Поэтому исследование разнообразных электронных, атомных и молекулярных процессов, происходящих на поверхности твердых тел, остается актуальной задачей. И заветное желание ученых (и не только ученых) на протяжении многих лет – непосредственное наблюдение за поведением отдельных атомов на поверхности твердого тела и изучение процессов с участием одиночных или небольших групп атомов.

Первостепенное значение для понимания свойств любого объекта имеет знание его атомной структуры, поэтому определение поверхностных структур – один из наиболее важных разделов физики поверхности. Последние 30 лет микроструктура поверхностей твердых тел интенсивно изучалась методами дифракции и рассеяния электронных и ионных пучков, а также электронной спектроскопии. Однако большинство этих методов первоначально разрабатывалось для исследования объемной структуры твердых тел, поэтому они не всегда годятся для получения информации о структуре поверхности, тем более на атомном уровне. Долгое время основным методом исследования структуры поверхностей служил метод дифракции медленных электронов (ДМЭ), с применением которого связан существенный прогресс в развитии науки о поверхности. Достаточно упомянуть, что с помощью ДМЭ была открыта атомная реконструкция поверхностей – существование особого их структурного состояния, отличного от объемного, и обнаружено большое количество специфических фазовых переходов на поверхностях, как чистых, так и покрытых адсорбированными пленками. В методе ДМЭ тонкий коллимированный моноэнергетический пучок электронов низкой (до десятков электронвольт) энергии направляется на поверхность исследуемого кристалла. Так как энергия падающих электронов сравнительно невелика, то они проникают на глубину всего одного-двух атомных слоев, поэтому анализ углового распределения дифракционных рефлексов, образованных рассеянным пучком, дает сведения о расположении атомов в поверхностном слое. Первые изображения атомов были получены с помощью полевого ионного микроскопа, изобретенного Э. Мюллером в 1951 году. В этом приборе игольчатый образец, обычно изготавливаемый из тугоплавкого металла типа вольфрама, располагается в вакуумной камере напротив флуоресцирующего экрана. Камера заполняется инертным газом (гелием или аргоном) до давления 10⁻⁴-10⁻⁵ торр, и после приложения к острию высокого положительного напряжения вблизи наиболее выступающих участков поверхности происходит полевая ионизация атомов газа за счет туннелирования их электронов в образец. Образовавшиеся ионы ускоряются

этим же полем и бомбардируют флуоресцирующий экран, отображая с большим увеличением выступающие участки.

Поэтому изобретение в 1982 году Г. Биннигом и Г. Рорером сканирующего туннельного микроскопа, который не накладывает ограничений на размеры образцов, реально открыло двери в новый микроскопический мир. (За изобретение нового класса электронных микроскопов – сканирующего туннельного микроскопа Г. Биннингу и Г. Рореру была присуждена Нобелевская премия по физике 1986 года.)

Принцип действия сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) довольно прост, но кардинально отличается от всех предшествующих методик, применявшихся в физике поверхности. Тонкое металлическое острие, смонтированное на электромеханическом приводе (X, Y, Z-позиционере, или сканере), служит зондом для исследования участков поверхности образца (рис. 17.1 а). Когда такое острие подводится к поверхности на расстояние $< 10 \text{ \AA}$, то при приложении между острием и образцом небольшого (от 0,01 до 10 В) напряжения смещения V_z через вакуумный промежуток δ_z начинает протекать туннельный ток I_t порядка 10^{-9} А . Полагая, что электронные состояния (орбитали) локализованы на каждом атомном участке, при сканировании поверхности образца в направлении X и / или Y с одновременным измерением выходного сигнала в цепи Z можно получить картину поверхностной структуры на атомном уровне.

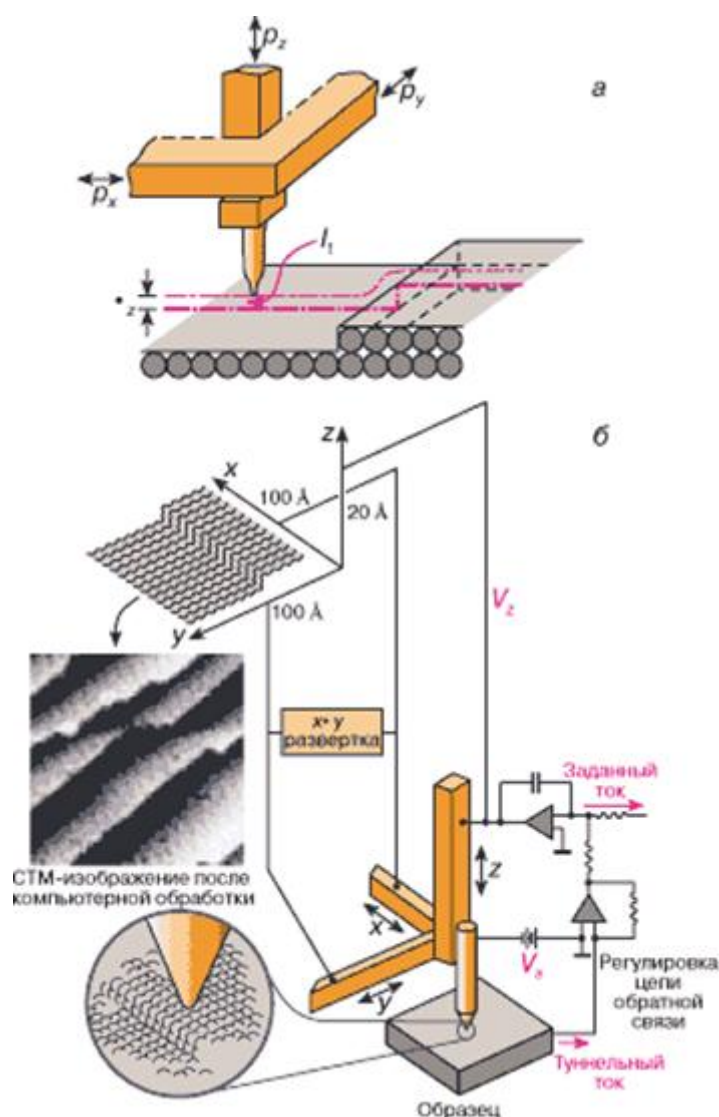


Рис. 17.1.

а – принцип действия СТМ:

p_x, p_y, p_z – пьезоэлементы; δ_z – туннельный вакуумный промежуток между острием-зондом и образцом; I_t – туннельный ток;

б – схема, иллюстрирующая работу СТМ

Эта [структура](#) может быть отображена в двух режимах: измеряя туннельный ток и поддерживая расстояние δ_z от острия до поверхности образца или измеряя изменения в положении острия (то есть расстояние до поверхности образца) при постоянном туннельном токе (второй режим используется чаще).

Туннельный ток, возникающий при приложении напряжения V_z , поддерживается постоянным за счет цепи обратной связи, которая управляет положением острия с помощью пьезоэлемента p_z . Запись осциллограммы напряжения V_z в цепи обратной связи при одновременном воздействии пилообразного напряжения развертки вдоль осей x и y образует туннельное изображение, являющееся своего рода репликой поверхности образца.

Вообще СТМ можно рассматривать как сочетание трех концепций: сканирования, туннелирования и локального зондирования. Само сканирование как средство отображения объекта широко применяется и в других типах микроскопов, например в растровом электронном микроскопе, а также в телевизионной технике, а электронное туннелирование с успехом использовалось для изучения физических свойств твердого тела задолго до появления СТМ (как и контактная спектроскопия). Все это делает СТМ уникальным микроскопом, который не содержит линз (а значит, изображение не искажается из-за аббераций), энергия электронов, формирующих изображение, не превышает нескольких электронвольт (то есть меньше энергии типичной химической связи), что обеспечивает возможность неразрушающего контроля объекта, тогда как в электронной микроскопии высокого разрешения она достигает нескольких килоэлектронвольт и даже мегаэлектронвольт, вызывая образование радиационных дефектов.

Все СТМ можно разделить на две основные группы: работающие на воздухе (или в другой среде) и в условиях сверхвысокого вакуума. Выделяют также низкотемпературные СТМ, работающие в условиях криогенных температур. В дальнейшем будем говорить только о сверхвысоковакуумных СТМ, работающих при комнатной температуре. Перечислим основные проблемы, стоящие перед разработчиками: 1) изоляция от акустических и механических [вибраций](#); 2) создание быстродействующей малощумящей электроники, работающей в широком динамическом диапазоне; 3) обеспечение надежных сверхвысоковакуумных условий, допускающих различные манипуляции с образцом; 4) изготовление тонких атомногладких острий-зондов и их диагностика.

Для подвода острия-зонда к образцу на расстояние δ_z , равное нескольким ангстремам, и сканирования вдоль поверхности использовался пьезодвигатель на основе пьезоэлектриков – это такие материалы, которые изменяют свои размеры под действием управляющего напряжения ([рис. 17.1 а](#)).

Схема, демонстрирующая устройство СТМ и его работу, приведена на [рис. 17.1 б](#). На пьезоэлемент p_z подается напряжение с выхода усилителя обратной связи, которое определяет величину зазора между образцом и острием и тем самым величину туннельного тока. Сам туннельный ток должен быть все время пропорционален заданному току, что поддерживается благодаря управляемой компьютером цепи обратной связи. На пьезоэлементы p_x и p_y под управлением того же компьютера подаются пилообразные напряжения, формирующие строчную и кадровую развертки (растр) подобно тому, как это осуществляется в телевидении. Осциллограммы напряжения V_z запоминаются компьютером, после чего преобразуются в зависимость $z(x, y)$, отображающую траекторию движения острия и, таким образом, являющуюся туннельным изображением поверхности образца. Как правило, записанные сигналы подвергаются фильтрации и дополнительной компьютерной обработке, позволяющей представить туннельные изображения в режиме так называемой серой шкалы, в котором контраст изображения коррелирует с рельефом поверхности: светлые пятна соответствуют более высоко расположенным областям и наоборот.

Несмотря на большие успехи [сканирующей туннельной микроскопии](#) (СТМ) было понятно, что СТМ обладает фундаментальным недостатком – с помощью [СТМ](#) можно исследовать только проводящие или покрытые проводящими пленками образцы.

Этот недостаток был преодолен с изобретением Биннигом [атомно-силового микроскопа](#). Он был первым, кто догадался, что при взаимодействии с поверхностью образца макроскопическая гибкая консоль ([кантилевер](#)) с острой иглой под действием атомных сил может быть изогнута на достаточно большую величину, чтобы быть измеренной с помощью обычных средств. В первом варианте для измерения изгиба [кантилевера](#) использовался [СТМ](#) ([рис. 17.2](#)).

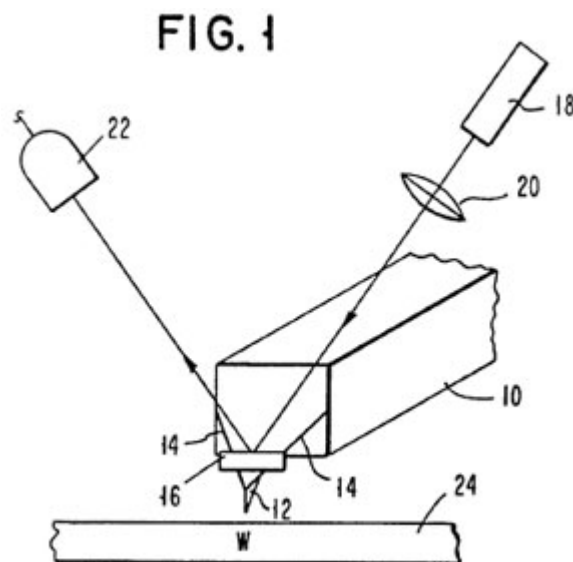


Рис. 17.2. Схематическое изображение АСМ по патенту "Atomic Force Microscope" (US RE37,299)

В дальнейшем для регистрации изгиба кантилевера было использовано много методов, но в настоящее время наиболее удобным и широко используемым является метод, предложенный Амером и Мейером. В соответствии с предложенным методом атомно-силовой микроскоп включает иглу, установленную на микромеханический кантилевер. В процессе сканирования исследуемой поверхности межатомные силы взаимодействия кончика иглы и поверхности образца вызывают смещение иглы и, соответственно, изгиб кантилевера.

Луч лазера направляется на кантилевер и отражается от него для измерения изгиба кантилевера. Отраженный лазерный луч детектируется позиционно-чувствительным (двухсекционным) фотоприемником. Выходной сигнал с двухсекционного фотоприемника подается на компьютер для выработки данных, отражающих рельеф поверхности образца с атомарным разрешением. Используемые в настоящее время позиционно-чувствительные фотодетекторы являются четырехсекционными и позволяют измерять не только продольные, но также и торсионные изгибы кантилевера.

Кантилевер может изгибаться не только под действием непосредственно [контактных сил](#), но также и под действием сил, действующих на расстоянии – относительно короткодействующих Ван дер Ваальсовых и более далекодействующих электрических и магнитных сил. В процессе сканирования кантилевер может совершать [колебания](#). Колебания могут происходить в [непосредственном контакте](#) иглы с поверхностью образца, без касания поверхности образца в процессе колебаний и с [частичным касанием поверхности](#) (с прерывистым контактом). Сканирование может осуществляться в [несколько проходов](#), каждый новый проход может давать дополнительную информацию относительно исследуемого образца.

Все эти возможности позволяют реализовать множество различных методов и методик проведения исследований. Используются различные [статические](#) и [динамические контактные](#), [прерывисто-контактные](#), [бесконтактные](#) и [многопроходные методы](#) и методики.

Кроме рассмотренных выше методов сканирующей зондовой микроскопии применяются различные приборы на основе лазерного излучения. Например, лазерный автодинный измеритель микро- и нановибраций ([рис. 17.3](#)) предназначен для бесконтактного контроля параметров вибраций и перемещений отдельных участков объектов в широком диапазоне значений [частот](#) и [амплитуд](#). Устройство обеспечивает измерения амплитуд вибраций от 1 нм до 10 мкм в полосе частот от единиц Гц до сотен МГц.

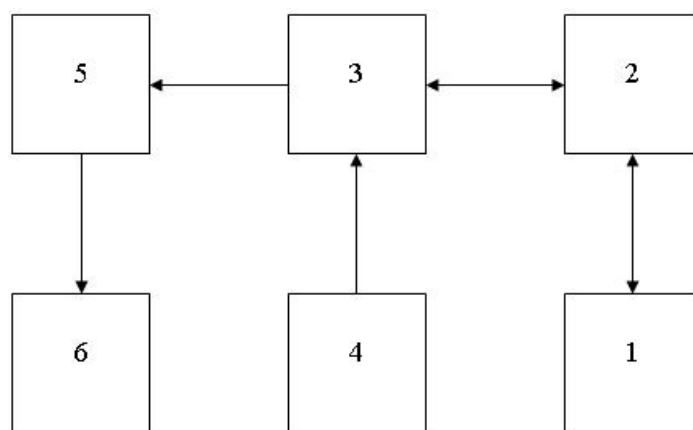


Рис. 17.3. Лазерный измеритель вибраций.

1 – объект, 2 – акустическая линия, 3 – лазер, 4 – источник питания лазера, 5 – усилитель, 6 – компьютер

Работа измерителя базируется на следующих принципах:

- измерение вибрационных характеристик с помощью полупроводникового лазера на квантово-размерных [структурах](#);
- определение амплитуды вибрации по максимальной гармонике;
- определение амплитуды колебаний на характерных гармонических частотах;
- абсолютные измерения микро- и нанометровых [вибраций](#).

ЛЕКЦИЯ 18

Компьютерные устройства и программы регистрации относительных колебаний режущего инструмента и обрабатываемой поверхности

КОМПЬЮТЕРИЗИРОВАННАЯ БАЛАНСИРОВКА СИСТЕМЫ «ШПИНДЕЛЬ-ЗАГОТОВКА»

Одним из наиболее существенных факторов, возбуждающих относительные [колебания](#) резца и заготовки, является дисбаланс [шпинделя](#) с установленной на нем [заготовкой](#). Литература по балансировке очень обширна, и в ней подробно излагаются разнообразные методики балансировки. Производственные потребности – необходимость увеличения точности и сокращение времени балансировки – потребовали разработки нового подхода, основанного на применении современного быстродействующего компьютера. Как отмечалось выше, амплитуда колебаний шпинделя, вызванная остаточным дисбалансом, не должна превышать сотых долей микрометра. Применяемые методики для достижения указанной точности требуют весьма длительной добалансировки (1-2 часа и даже более), что многократно превышает время обработки деталей (5-7 минут). Учитывая, что рабочие частоты вращения шпинделя ОТТС в 3-7 раз меньше низшей собственной частоты колебаний и в 3-6 раз больше частоты пропускания виброизолирующих аэростатических опор станины (то есть фазовый угол между перемещениями от статического и моментного дисбалансов практически равен нулю), можно рассматривать дисбаланс шпинделя как квазистатический. Это позволяет проводить балансировку шпинделя ОТТС по методу амплитуд, измеряя колебания станины одним [датчиком](#) абсолютных колебаний, установленным так, чтобы его ось лежала в плоскости, перпендикулярной оси вращения, и пересекала ее.

По сравнению со стандартной методикой, по которой требуется минимум 4 измерительных пуска шпинделя с последующей достаточно длительной процедурой расчетов, предлагаемая методика требует только трех пусков, причем обработка полученных данных производится на ПК.

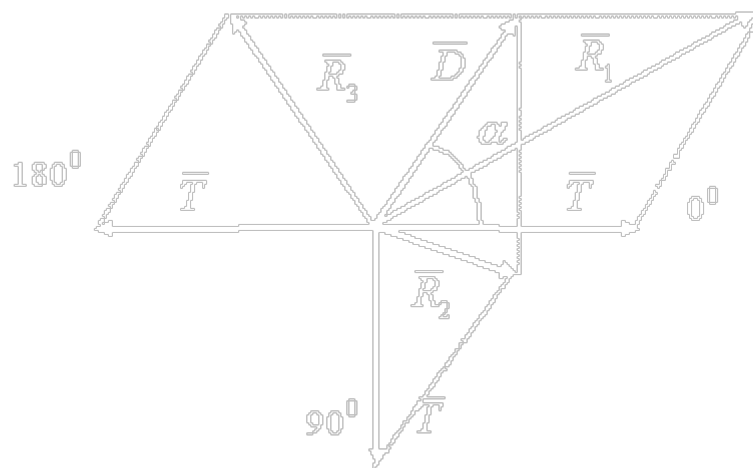


Рис. 18.1. Векторная диаграмма для компьютерного расчета дисбаланса шпинделя по методу трех пусков

Математическая модель способа основана на анализе векторной диаграммы перемещений шпинделя (рис. 18.1). Диаграмма содержит 3 параллелограмма, построенных на модуле вектора устраняемого дисбаланса $\bar{D}$ (во всех трех параллелограммах отрезок D является одной из сторон). Вторая сторона этих параллелограммов также одинакова по величине – это модуль вектора пробной массы $\bar{T}$. Диагонали параллелограммов – модули измеренных амплитуд колебаний при трех пусках R_1 , R_2 и R_3 при разных углах установки тарировочного груза. Углы между сторонами параллелограммов равны $\alpha, (90^\circ + \alpha), (180^\circ - \alpha)$. Таким образом, по тригонометрическим формулам можно составить систему из трех трансцендентных уравнений с тремя неизвестными D , T и α :

$$\begin{aligned} R_1^2 &= T^2 + D^2 + 2 \cdot T \cdot D \cdot \cos \alpha, \\ R_2^2 &= T^2 + D^2 - 2 \cdot T \cdot D \cdot \sin \alpha, \\ R_3^2 &= T^2 + D^2 - 2 \cdot T \cdot D \cdot \cos \alpha, \end{aligned} \quad (18.1)$$

где: R_1 , R_2 и R_3 – измеренные амплитуды колебаний при трех вариантах установки тарировочного груза – соответственно 00, 900 и 1800,

T – амплитуда колебаний станины от действия тарировочного груза,

D – начальный дисбаланс,

α – угол расположения начального дисбаланса.

Решая полученную систему численным методом на компьютере, определяем затем величину корректирующей массы:

$$m_k = m_T \cdot D / T, \quad (18.2)$$

где: m_k и m_T – величины соответственно корректирующей и тарировочной массы.

Для решения вопроса о том, в каком квадранте должен располагаться угол α , в программе предусмотрена специальная процедура.

По разработанной методике и программного обеспечения были проведены цеховые испытания предложенного способа балансировки на особо точном токарном станке МК6514 МСПО "Красный пролетарий".

Эксперимент был спланирован следующим образом. В четырех местах балансировочной канавки с угловыми координатами 60° , 120° , -60° и -120° поочередно вставлялся груз массой 4,17 г, создавая тем самым известный дисбаланс. Сравнивались результаты опытов по точности и трудоемкости балансировки по разработанной методике и стандартной методике четырех пусков: определялось значение дисбаланса и углы его расположения.

Оба метода по точности дали практически одинаковые результаты.

Итоговые результаты приведены в [таблице 18.1](#). Как можно видеть, оба метода дают практически одинаковые результаты. Ошибка в определении угла установки ($+1,07^0-0,85^0$), по-видимому, отражает неточность установки груза по углу, об этом свидетельствуют одинаковые расчетные значения по двум методикам. Неточности заданной угловой установки отразились и на расчетных величинах корректирующей массы ($-0,1 \text{ г}+0,1 \text{ г}$). Расчет средних по четырем углам значений корректирующих масс дает очень хорошее совпадение с исходной величиной – 4,165 г и 4,162 г.

Табл. 18.1
Результаты цеховых испытаний способа уравнивания шпинделя по абсолютным колебаниям станины

Измеряемые вычисляемые величины	Угол установки тарировочного груза (в градусах)			
	60	0	12	120
D [мВ]	169	16	175	142
R ₁ [мВ]	329	190	336	198
R ₂ [мВ]	105	109	372	372
R ₃ [мВ]	195	331	193	331
α [град.] – по четырем пускам	60,52	121,07	-59,15	-119,25
mг [грамм] – по четырем пускам	4,09	4,07	4,27	4,23
α [град.] – по трем пускам	60,52	121,07	-59,15	-119,25
mг [грамм] – по трем пускам	4,09	4,12	4,23	4,21

В результате проведенных вычислительных процедур и установки [балансировочных грузов](#) в расчетные положения значение остаточного дисбаланса, осредненного по результатам четырех дублирующих экспериментов, составило 3,74 мВ (что соответствовало амплитуде колебаний шпинделя от остаточного дисбаланса 0,0475 мкм при среднеквадратичном отклонении 0,00433).

Применение предложенной методики позволило выполнить все процедуры для одной установки, а также расчета по ней за 7 минут, в то время как стандартная методика, основанная на построении векторных диаграмм, для подобной работы потребовала более 60 мин. При этом из-за недостаточной точности расчетов по стандартной методике и невозможности реализовать точную величину балансировочной массы пришлось в течение более 90 минут добалансировать [шпиндель](#) для достижения требуемого минимума дисбаланса.

Существенным недостатком всех методик балансировки, использующих установку [балансировочного груза](#) в балансировочную канавку, выполненную по периметру шпинделя, является недостаточная точность установки этого груза по рискам, нанесенным на шпинделе. Кроме того, как правило, величины рассчитанной корректирующей массы и угла ее установки получаются дробными, что требует подгонки массы. Округление значений приводит к появлению значительного остаточного дисбаланса, что снижает эффект балансировочной процедуры. Кроме того, даже если значение угла установки и будет выражено целым числом, оператор не имеет возможности точно его реализовать, так как установка корректирующего груза производится по рискам, нанесенным на периферии балансировочной канавки. Это приводит к необходимости с помощью многократных пусков методом проб и ошибок проводить подбалансировку до получения требуемого уровня остаточного дисбаланса.

Одним из вариантов решения этой проблемы является дискретность угловой установки (например, точно через один угловой градус) и набор [балансировочных грузов](#) с точно фиксированными значениями масс (например, через один грамм). Специально разработанная компьютерная программа осуществляет поиск вариантов набора дискретных значений масс балансировочных грузов (из комплекта, имеющегося у наладчика) и дискретных значений углов их установки, которые удовлетворяли бы допустимому дисбалансу.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ГАШЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ ШПИНДЕЛЕЙ ОСОБО ТОЧНЫХ ТОКАРНЫХ СТАНКОВ

Современные прецизионные станки могут обеспечить точность размеров порядка $\pm(10-1) \text{ мкм}$ и шероховатость поверхности 0,08-0,032 мкм при условии высокой жесткости технологической системы,

применения массивных и хорошо [демпфированных](#) фундаментов, аэростатических подшипников, тщательной [балансировки](#) и строгого соблюдения постоянства температурного режима.

Однако развитие техники и технологии требует перехода на более высокий уровень точности, приближения к допустимым отклонениям размеров порядка $\pm(0,1-0,01)$ мкм и шероховатости поверхности 0,016-0,0032 мкм. При изготовлении ряда изделий массового и серийного производства, таких как диски памяти, металлические зеркала для лазеров и т.п., необходимо обеспечить быструю точную наладку и поддержание стабильности относительного положения узлов, несущих режущие [инструменты](#) и обрабатываемое изделие.

В частности, необходимо решить задачу стабилизации относительного положения обрабатываемой [детали](#) и инструмента на [особо точных токарных станках](#), конкретнее – стабилизацию положения оси [шпинделя](#).

Однако достигнуть следующего уровня точности и качества поверхности обработанных изделий балансировкой, выполненной перед началом обработки, невозможно по ряду причин, из которых самыми важными являются:

- разбалансировка шпинделя в процессе обработки в рамках одного прохода из-за неравномерности съема металла с обрабатываемой поверхности;
- погрешности изготовления и сборки подшипниковых узлов, отклонения их поверхностей от идеальной геометрической формы, которые вызывают при вращении переменные радиальные силы, причем достаточно сложного спектрального состава.

Поэтому необходима разработка методов стабилизации положения оси шпинделя, возникающей из-за указанных причин. Решение этой задачи требует создания математических моделей и, в связи с их нелинейностью, анализа методами компьютерного моделирования.

Внутрисистемное возбуждение колебаний, связанное с нестабильностью припуска, может быть уменьшено путем многопроходной обработки, однако это вызывает неоправданное многократное увеличение машинного времени и расхода [инструмента](#). Вторая причина внутрисистемного возбуждения колебаний – отклонения формы и размеров поверхностей в подшипниковых узлах – не может быть компенсирована каким-либо способом, кроме направленного силового «контрвоздействия».

Рассмотрим схему одного из вариантов математической [модели](#) ([рис. 18.2](#)). Шпиндель особо точного токарного станка установлен на опорах с аэростатическими подшипниками. В направлении оси X расположен световолоконный [датчик](#) перемещения СВПП с разрешающей способностью 0,01 мкм. Под углами 45° , 135° , 225° и 315° к оси X закреплены четыре электромагнитных вибратора (ЭМВ1...ЭМВ4) бесконтактного типа, работающие на притяжение. Внешним якорем каждого вибратора является непосредственно шпиндель [станка](#). Шпиндель вращается вокруг своей оси против часовой стрелки.

На [рис. 18.2](#) показано положение [шпинделя](#) в произвольно взятый момент времени t . Предположим, что в этот момент дисбаланс D находится на угловом расстоянии α от оси X в направлении против часовой стрелки. Этот дисбаланс D создает центробежную силу F , которая вызывает осевое смещение в направлении A . Из-за диссипативных свойств системы вектор перемещения оси шпинделя будет отставать от направления вектора F на угол φ . Чтобы компенсировать вектор силы дисбаланса F , необходимо задействовать электромагниты $ЭМВ3$ и $ЭМВ4$ сил, которые должны создать усилия $FM3$ и $FM4$, векторная сумма которых уравнивает силу F . Описанный механизм компенсации отклонений оси шпинделя происходит автоматически за счет функциональной связи сигнала [датчика](#) СВПП Аизм с величиной вектора A .

Моделирование проводилось как для «идеального» электромагнитного вибратора без учета отставания по фазе силы электромагнита от силы тока, так и с учетом фазового сдвига.

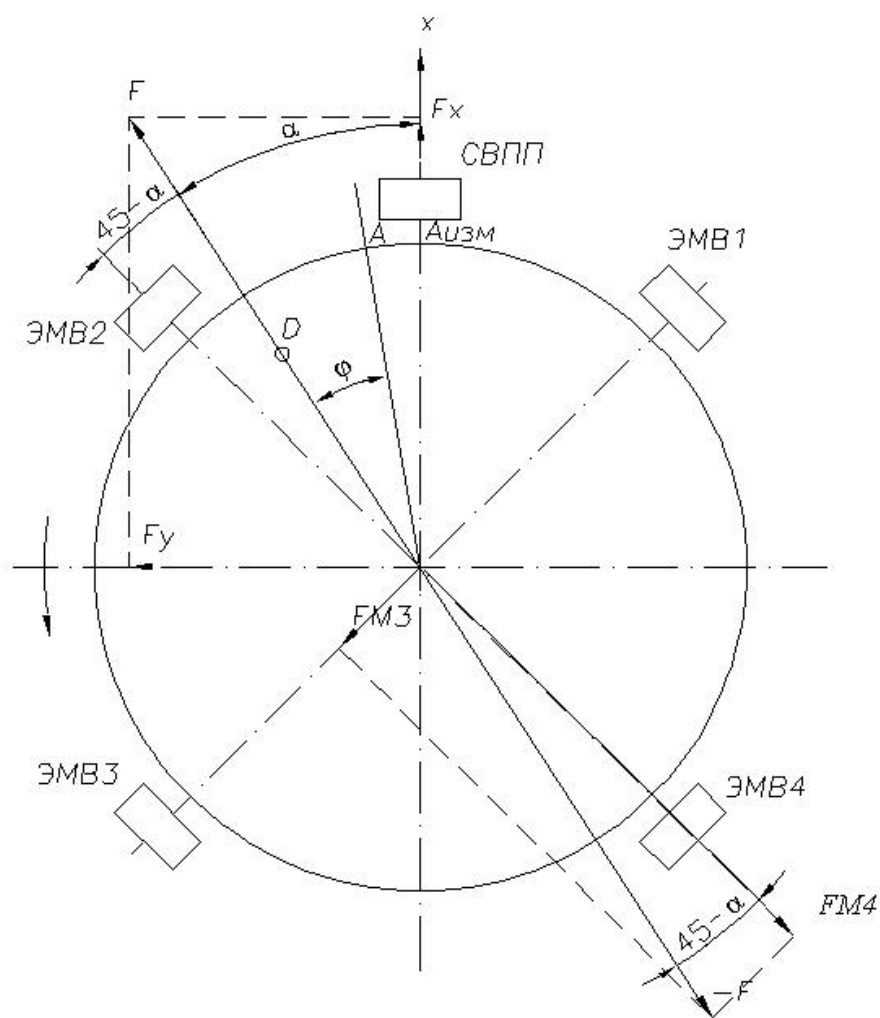


Рис. 18.2. Схема системы управления процессом гашения колебаний при вращении оси быстроходного ротора

Пример демпфирования колебаний показан на [рис. 18.3](#) (вибросмещения шпинделя) и [18.4](#) (виброскорости шпинделя). Моделировался шпиндель с параметрами: $H = 12400 \text{ Н/с}$, $C = 44400000 \text{ Н/м}$, $m = 50 \text{ кг}$, $D = 5 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$ (масса дисбаланса), $\omega = 314 \text{ рад/с}$.

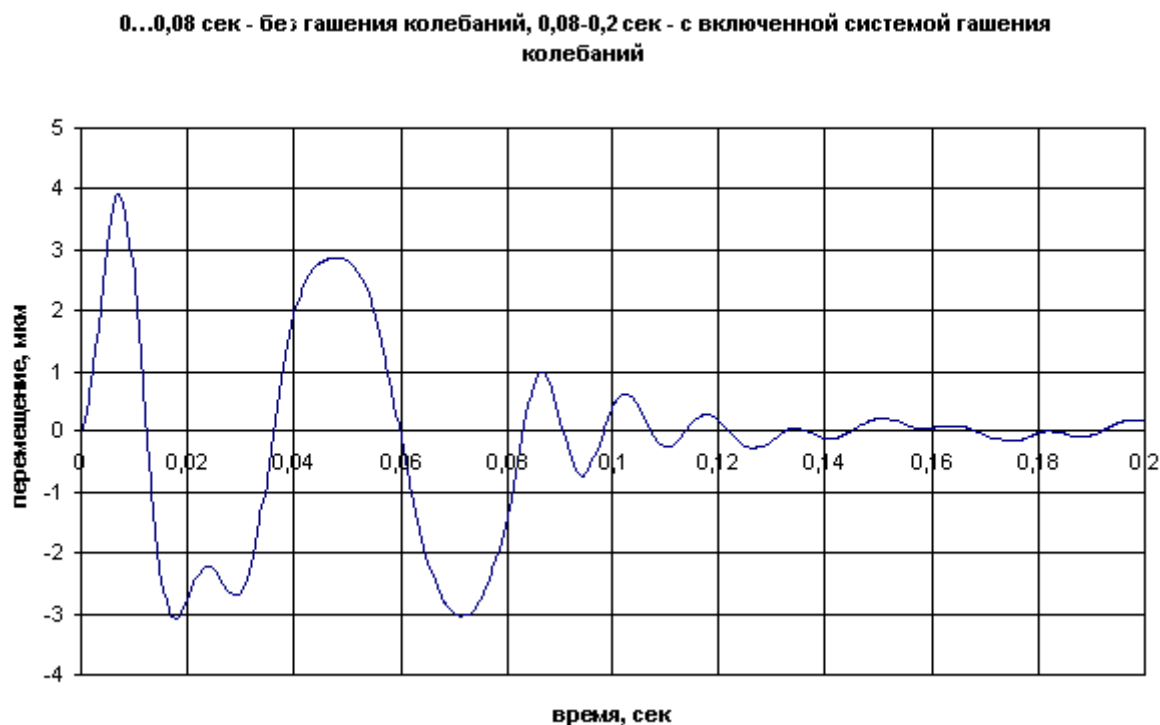


Рис. 18.3. Колебательное перемещение ротора

Для наглядности показаны [колебания](#) без обратной связи и после момента включения системы гашения колебаний (система включалась через 0,08 сек после включения вращения шпинделя).

Выполненный анализ на компьютерной [модели](#) показал, что система гашения колебаний с четырьмя электромагнитами с обратной связью по перемещению не обеспечивает снижение уровня колебаний по амплитуде, меньших, чем $\pm 0,02$ мкм.



Рис. 18.4. Колебательная скорость ротора

Дальнейшее уменьшение [амплитуды](#) остаточных колебаний может быть реализовано путем силового бесконтактного воздействия на [шпиндель](#) с обратной связью одновременно по перемещению и по скорости колебательного движения. Структурная схема разработанной математической модели такого

метода представлена на [рис. 18.5](#). Она включает высокочувствительный [датчик](#) относительных перемещений 2 (световолоконный или вихретоковый), два электромагнитных бесконтактных вибратора 11 и 12, установленных диаметрально симметрично относительно оси вращения шпинделя 1. Сигнал датчика поступает на фазовращатель 5 (для поднастройки фазовых сдвигов) и в устройство визуального контроля 4. Так как бесконтактные электромагнитные вибраторы работают только на притяжение, необходимо обеспечить их синхронное переключение. Для этого сигнал после фазовращателя с помощью диодов 6 и 7 расщепляется на два потока. Положительный сигнал направляется в блок извлечения квадратного корня 9, а отрицательный вначале инвертируется элементом схемы 8, а затем также направляется в другой блок 9. Затем оба сигнала поступают в двухканальный усилитель мощности 10 и из него – на вибраторы 11 и 12.

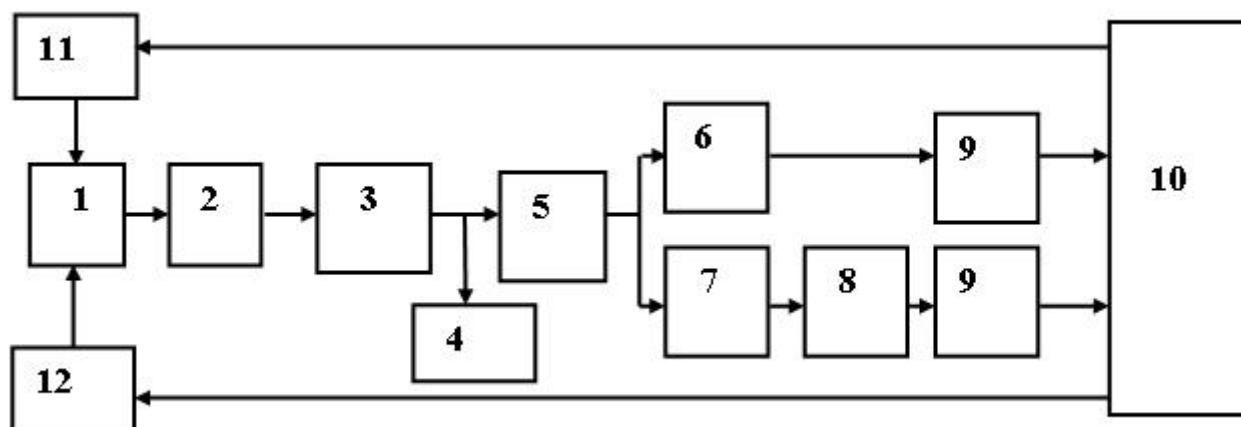


Рис. 18.5. Блок-схема системы автоматического компьютеризированного гашения колебаний, вызванных дисбалансом

1 – шпиндель, 2 – бесконтактный датчик, 3 – усилитель сигнала, 4 – устройство визуального контроля, 5 – фазовращатель, 6 и 7 – диоды, 8 – инвертор, 9 – блоки извлечения квадратного корня, 10 – усилитель мощности, 11 и 12 – бесконтактные электромагнитные вибраторы

На [рис. 18.6](#) показан пример реализации компьютерного эксперимента на математической модели, построенной на базе особо точного токарного станка. Масса шпинделя – 50 кг, частота вращения шпинделя – 3000 об/мин, [жесткость](#) аэростатических опор – $4,44 \cdot 10^7$ Н/м, коэффициент демпфирования в опорах – $1,24 \cdot 10^4$ Нс/м.

После пуска [шпинделя](#) примерно через 0,02 сек переходный процесс заканчивается, и планшайба совершает установившиеся колебания с [амплитудой](#) вибросмещений 2,8 мкм. В наладочном режиме производится регулировка фазовых сдвигов и коэффициента усиления обратной связи (режим наладки на осциллограмме не показан). Силы притяжения вибраторов сдвинуты по фазе друг относительно друга на 180° и постоянно находятся в противофазе с колебаниями планшайбы шпинделя. После включения вибраторов (на осциллограмме в момент времени 0,035 сек) в течение примерно двух оборотов шпинделя колебания снижались до уровня 2 нм. На протяжении всей последующей работы вибраторы постоянно поддерживают достигнутое минимальное значение амплитуды [колебаний](#) шпинделя.

Установившиеся колебания (слева) и переходный процесс гашения колебаний (справа)

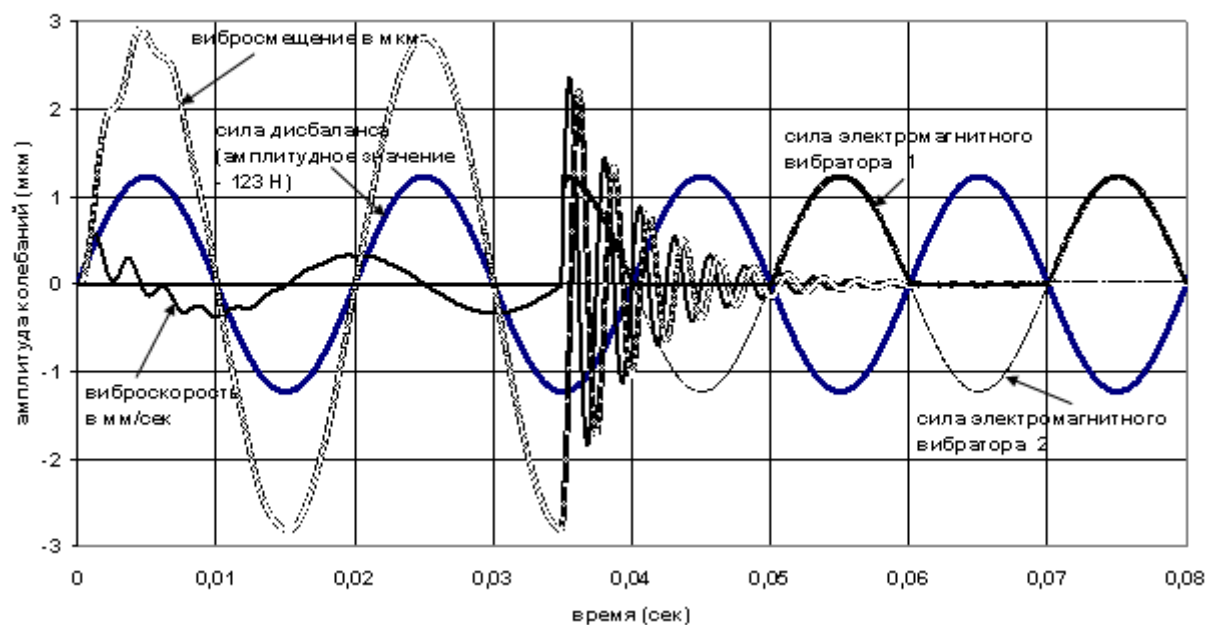


Рис. 18.6. Одна из реализаций компьютерного эксперимента по гашению колебаний шпинделя

Таким образом, на математической [модели](#) показана принципиальная возможность стабилизации положения оси быстроходного [ротора](#) с помощью системы обратной связи по смещению и по скорости оси от теоретического положения.

Адгезия (от лат. adhaesio - прилипание) в физике - сцепление поверхностей разнородных твёрдых и/или жидких тел. Адгезия существенно влияет на природу трения соприкасающихся поверхностей: так, при трении поверхностей с низкой адгезией трение минимально.

Автоколебания — незатухающие колебания в диссипативной нелинейной системе с отрицательной обратной связью, поддерживающиеся за счёт энергии постоянного, т.е. непериодического внешнего воздействия.

Амплитуда — максимальное значение смещения или изменения переменной величины при колебательном или волновом движении. Неотрицательная скалярная величина, измеряется в единицах, зависящих от типа волны или колебания.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) — функция, показывающая зависимость модуля некоторой комплекснозначной функции от частоты. Чаще всего означает модуль комплексного коэффициента передачи линейного четырёхполюсника.

Амплитудно-фазовая частотная характеристика (АФЧХ) — удобное представление частотного отклика линейной стационарной динамической системы в виде графика в полярных координатах. На таком графике частота выступает в качестве параметра кривой, фаза и амплитуда системы на заданной частоте представляется углом и длиной радиус-вектора каждой точки характеристики. По сути такой график объединяет на одной плоскости амплитудно-частотную и фазо-частотную характеристики.

Атомно-силовой микроскоп ([англ. AFM - atomic force microscope](#)) — сканирующий зондовый микроскоп высокого разрешения, основанный на взаимодействии иглы [кантилевера](#) (зонда) с поверхностью исследуемого образца. Обычно под взаимодействием понимается притяжение или отталкивание кантилевера от поверхности из-за сил Ван-дер Ваальса. Но при использовании специальных кантилеверов можно изучать электрические и магнитные свойства поверхности. В отличие от сканирующего туннельного микроскопа (СТМ), может исследовать как проводящие, так и непроводящие поверхности даже через слой жидкости, что позволяет работать с органическими молекулами ([ДНК](#)). Пространственное разрешение атомно-силового микроскопа зависит от размера кантилевера и кривизны его острия. Разрешение достигает атомарного по горизонтали и существенно превышает его по вертикали.

Балансировка - уравнивание вращающихся машинных частей (ротора турбины или электродвигателя, коленчатого вала, шкивов и другие). Для большинства роторов машин осью вращения является ось, проходящая через центры опорных поверхностей цапф изделия. Несовпадение этой оси с главной центральной осью инерции (что может быть результатом погрешностей технологии изготовления изделия либо его конструктивных особенностей) приводит к появлению нескомпенсированных центробежных сил и моментов, вызывающих быстрый износ подшипников, повышенные вибрации машины, изгибные колебания её элементов и др.

Балансировочный груз — уравнивающая масса, устанавливаемая на роторе при проведении балансировки.

Вакансия - дефект кристалла, представляющий собой отсутствие атома или иона в узле кристаллической решётки. В. имеются во всех кристаллах, как бы тщательно эти кристаллы ни выращивались. В реальном кристалле В. возникают и исчезают в результате теплового движения атомов. Механизм образования В. можно представить как выход атомов поверхностного слоя на поверхность с последующим переходом возникающих поверхностных "дырок"

Вибрация (лат. *Vibratio* — колебание, дрожание) — механические колебания.

О вибрации также говорят в более узком смысле, подразумевая механические колебания, оказывающее ощутимое влияние на человека. В этом случае подразумевается частотный диапазон 1,6—1000 Гц.

Вибронакатывание — процесс накатывания с наложением вибраций на инструмент в направлении подачи.

Вибровыглаживание - процесс выглаживания с наложением вибраций на инструмент в направлении подачи.

Волнистость занимает промежуточное положение между отклонениями формы и шероховатостью поверхности. Возникновение волнистости связано с динамическими процессами, вызываемыми потерей устойчивости системы станок-приспособление-инструмент-деталь и выражающимися в возникновении вибраций.

Выглаживание является одним из методов отделочно-упрочняющей обработки поверхности пластическим деформированием и заключается в пластическом деформировании обрабатываемой поверхности скользящим по ней инструментом – выглаживателем, закрепленным в оправке алмазным кристаллом.

Высокоскоростная обработка резанием деталей из черных и цветных металлов является новой и прогрессивной технологией, которая интенсивно разрабатывается и внедряется в практику. Высокоскоростным следует считать резание, при котором скорость возрастает в 10 и более раз по сравнению с уровнем, установившемся для данного обрабатываемого материала. Уровень скоростей резания сталей и чугунов в машиностроении в настоящее время составляет 100 – 300 м/мин. Рост скорости ограничивается теплофизическими характеристиками традиционных инструментальных материалов – твердых сплавов и быстрорежущих сталей. Высокоскоростное резание – 500 – 5000 м/мин и более, оно возможно на базе внедрения качественно новых инструментальных материалов

Глубина резания — это толщина снимаемого слоя металла за один проход, измеряемая в направлении, перпендикулярном подаче. Глубина резания – один из элементов режима резания.

Давление - физическая величина, равная отношению силы к площади поверхности приложения этой силы. Давление в физике — отношение силы, нормальной к поверхности взаимодействия между телами, к площади этой поверхности или в виде формулы: $P = F/S$.

Датчик (измерительный преобразователь) – устройство, которое преобразует одну величину или форму энергии в другую. Каждый датчик имеет определенную входную величину, которая наилучшим образом воспринимается на фоне помех, и выходную величину. Между выходной и входной величинами существует зависимость, определяющая функцию преобразования датчика.

Демпфирование колебаний, искусственное подавление колебаний механических, электрических и др. систем. **Демпфирование** может осуществляться за счёт увеличения затухания, для чего на системе устанавливаются демпферы (например, поршни, движущиеся в вязкой среде). **Демпфирование** уменьшает амплитуду колебаний в системе, а если добротность колебательной системы понижается до величины 0,5, то колебательное движение превращается в аperiodическое.

Деталь – первичная монолитная часть изделия, получается из исходных материалов, полуфабрикатов и заготовок в результате различных технологических процессов.

Дефекты в кристаллах (от лат. defectus - недостаток, изъян), нарушения полностью упорядоченного расположения частиц (атомов, ионов, молекул), характерного для идеального кристалла. Образуются в процессе роста кристалла из расплава или раствора, а также под влиянием внеш. воздействий (тепловых, электрич., мех., при разл. видах облучения), при введении примесей. Различают точечные (нульмерные), линейные (одномерные), поверхностные (двухмерные) и объемные (трехмерные) Д.

Деформация (от лат. *deformatio* — искажение) — изменение относительного положения частиц тела, связанное с их перемещением. Деформация представляет собой результат изменения межатомных расстояний и перегруппировки блоков атомов. Обычно *деформация* сопровождается изменением величин межатомных сил, мерой которого является упругое напряжение. Деформации разделяют на упругие и пластические. Упругие деформации исчезают, а пластические остаются после окончания действия приложенных сил. В основе упругих деформаций лежат обратимые смещения атомов металлов от положения равновесия; в основе пластических — необратимые перемещения атомов на значительные расстояния от исходных положений равновесия.

Деформационное упрочнение - увеличение сопротивляемости кристалла пластической деформации при активном нагружении. По современным представлениям физики пластичности основная причина упрочнения - затруднение движения дислокаций по кристаллу вследствие увеличения их количества в кристалле и связанного с этим усиления взаимодействия дислокаций друг с другом.

Дислокации в кристаллах - дефекты кристалла, представляющие собой линии, вдоль и вблизи которых нарушено характерное для кристалла правильное расположение атомных плоскостей. Д. и другие дефекты в кристаллах определяют многие физические свойства кристаллов, называемые структурно-чувствительными. В частности, механические свойства кристаллов — прочность и пластичность — обусловлены существованием Д. и их особенностями.

Долговечность - свойство изделия сохранять работоспособность до предельного состояния с необходимыми перерывами для технического обслуживания и ремонтов. Предельное состояние изделия определяется в зависимости от его схемно-конструктивных особенностей, режима эксплуатации и сферы использования. Для многих неремонтируемых изделий (например, осветительные лампы, шестерни, узлы бытовых электро- и радиоприборов) предельное состояние совпадает с отказом. В ряде случаев предельное состояние определяется достижением периода повышенной интенсивности отказов.

Дорнование – вид обработки заготовок без снятия стружки. Сущность дорнования сводится к перемещению в отверстие заготовки с натягом жесткого инструмента – дорна. Размеры поперечного сечения инструмента больше размеров поперечного сечения отверстия заготовки на величину натяга. Дорнование подразделяют на поверхностное и объёмное. При поверхностном дорновании пластически деформируется поверхностный слой, при объёмном – пластическое деформирование происходит по всему поперечному сечению обрабатываемой детали. Поверхностное дорнование относят к методам поверхностного пластического деформирования (ППД), а объёмное дорнование к методам обработки металлов давлением (ОМД).

Жесткость технологической системы - способность оказывать сопротивление перемещению выбранной точки в направлении действия силы, порождающей это перемещение. Жесткость не может быть отрицательной или бесконечно большой. Величина обратная жесткости, получила название податливости.

Заготовка в разных производствах полупродукт, служащий для изготовления готового изделия. Например, в металлургии — полупродукт, получающийся из слитка в результате его предварительной обработки прокаткой на блюмингах, слябингах или т. н. заготовочных станах. В машиностроении заготовкой под механическую обработку являются отливки или прокат. Заготовки могут быть штучными или прутковыми.

Заедание - наиболее яркая форма проявления схватывания, в результате которого может произойти полное нарушение подвижности сопряжения и заклинивание деталей.

Защитное покрытие - покрытие, создаваемое на поверхности изделия или конструкции для защиты от коррозии или других вредных воздействий со стороны внешней среды.

Изнашивание - поверхностное разрушение или повреждение поверхности материала при работе под действием трения и высоких напряжений. Испытание на И. производят на лабораторных машинах, допускающих варьирование условий трения, и на специализированных машинах, сконструированных применительно к типовым условиям службы отдельных деталей машин.

Износ - изменение размеров, формы, массы или состояния поверхности изделия вследствие разрушения (изнашивания) микрообъемов поверхностного слоя изделия при трении. И. деталей машин зависит от условий трения, свойств материала и конструкции изделия. И. можно рассматривать как механический процесс, осложнённый действием физических и химических факторов, вызывающих снижение прочности микрообъемов поверхностного слоя. По условиям внешнего воздействия на поверхностный слой различают И.: абразивный, кавитационный, эрозионный и др. И. приводит к снижению функциональных качеств изделий и к потере их потребительской ценности.

Износостойкость - сопротивление материалов изнашиванию. И. деталей оценивается при испытаниях на стенде или в эксплуатационных условиях по длительности работы подвергаемых испытаниям материалов или изделий до заранее заданного или предельного значения износа. И. материалов определяется как их условная техническая характеристика при испытании на специальных лабораторных машинах, обеспечивающих моделирование реальных процессов изнашивания.

Инструмент (режущий) - орудие производства для изменения формы и размеров обрабатываемой заготовки путём удаления части материала в виде стружки с целью получения готовой детали или полуфабриката. Различают станочный и ручной инструмент. Основные части инструмента: рабочая, которая может иметь режущую и калибрующую части, и крепёжная.

Кантилевер (калька с английского *cantilever*, буквально - *консоль*) — устоявшееся название наиболее распространенной в сканирующей атомно-силовой микроскопии конструкции микромеханического зонда. Кантилевер представляет собой массивное прямоугольное основание, размерами примерно 1.5x3.5x0.5 мм, с выступающей из него балкой (собственно кантилевером), шириной порядка 0.03 мм и длиной от 0.1 до 0.5 мм. Одна из сторон балки является зеркальной, что позволяет использовать оптическую систему контроля изгиба кантилевера. На противоположной стороне балки на свободном конце находится игла, взаимодействующая с измеряемым образцом. Радиус острия иглы промышленных кантилеверов находится в пределах 5—50 нм, лабораторных — от 1 нм.

Капиллярная сила - явления, вызываемые влиянием сил межмолекулярного взаимодействия. Она оказывает воздействие на равновесие и движение:

- свободной поверхности жидкости;
- поверхности раздела несмешивающихся жидкостей; и
- границ жидкостей с твердыми телами.

Качество поверхностного слоя (качество поверхности) – совокупность свойств поверхностного слоя. Качество как категория - совокупность свойств (техничко-экономических и эстетических), обуславливающих способность удовлетворять определенные потребности в соответствии с назначением вещи, продукции, товара.

К. п. охватывает не только потребительские, но и технологические свойства, конструкторские особенности, надежность, долговечность и др. Свойства, составляющие К. п., характеризуются с помощью непрерывных или дискретных величин, называемых показателями К. п., которые должны иметь количественный измеритель.

Укрупнено эти показатели характеризуют:

- геометрические параметры неровностей поверхности;
 - физическое состояние;
 - химический состав;
 - механическое состояние.
-

Колебания - повторяющийся процесс изменения с течением времени значения физической величины около ее среднего значения. Колебания характеризуются амплитудой, периодом, частотой и фазой. Различают неперидические, периодические и гармонические колебания. В зависимости от физической природы различают механические, электромагнитные и другие колебания.

Концентрация напряжений в теории упругости - сосредоточение больших напряжений на малых участках, прилегающих к местам с резким изменением формы поверхности или сечения деформированного тела. Факторами, обуславливающими К. н. (т. н. концентраторами напряжений), могут быть отверстия, полости, трещины, выточки, надрезы, углы, выступы, острые края, резьба, а также различные неровности поверхности (риски, царапины, метки, неровности поверхности сварных швов и т. п.). Для распределения напряжений σ в зоне К. н. характерно резкое изменение напряжённого состояния, сопровождаемое быстрым затуханием напряжений при удалении от этой зоны. Чем больше максимальное напряжение в месте концентрации по сравнению с т. н. номинальным напряжением (равным среднему нормальному растягивающему напряжению по наиболее узкому поперечному сечению образца), тем резче наблюдается затухание напряжений при удалении от наиболее напряжённой зоны.

Коэффициент трения - отношение силы трения F к реакции T , направленной по нормали к поверхности касания, возникающей при приложении нагрузки, прижимающей одно тело к другому: $f = F/T$. Т. к. — характеристика, применяемая при выполнении технических расчётов, характеризующих фрикционное взаимодействие двух тел.

Кристалл - твердое тело, состоящее из упорядоченных, периодически повторяющихся в пространстве частиц. Обычно кристаллы образуются и растут из раствора или расплава. По характеру симметрии различают 32 класса кристаллов.

Кристаллическая структура (структура кристалла) неорганических соединений - закономерное пространственное расположение атомов, ионов (иногда молекул), составляющих кристаллические вещества. Расшифровка структуры кристалла - одна из основных задач кристаллографии.

Кристаллическая решетка - пространственная структура, которую формируют частицы, образующие кристаллы. Основу кристаллической решетки составляет элементарная решетка определенной геометрической формы, в вершинах (узлах) которой расположены атомы, молекулы или ионы.

Лазерное упрочнение - термическое действие лазерного излучения. Может быть применено для поверхностной термообработки (закалка и "залечивание" микродефектов оплавлением) быстроизнашивающихся металлических деталей, например режущего инструмента.

Материаловедение - наука о материалах. Под материалом понимается вещество, предметы, идущие на изготовление деталей и изделий.

Межузельный атом - точечный дефект кристалла. В кристаллах могут присутствовать чужеродные (примесные) атомы или ионы, замещая основные частицы, образующие кристалл, или внедряясь между ними. Точечными дефектом в кристалле являются также собственные атомы или ионы, сместившиеся из нормальных положений (межузельные атомы и ионы).

Металлы - простые вещества, обладающие в обычных условиях характерными свойствами: высокой электропроводностью и теплопроводностью, отрицательным температурным коэффициентом

электропроводности, способностью хорошо отражать электромагнитные волны (блеск и непрозрачность), пластичностью. М. в твёрдом состоянии имеют кристаллическое строение. В парообразном состоянии М. одноатомны.

Механическая обработка — обработка заготовки из различных материалов при помощи механического воздействия различной природы с целью создания по заданным формам и размерам изделия или заготовки для последующих технологических операций.

В машиностроении используется 3 вида механической обработки:

1. Обработка резанием, осуществляется на металлорежущих станках путём внедрения инструмента в тело заготовки с последующим выделением стружки и образованием новой поверхности.

2. Обработка методом пластической деформации - осуществляется под силовым воздействием внешней силы, при этом меняется форма, конфигурация, размеры, физикомеханические свойства детали. Это процессы: ковка, штамповка, прессование, накатывание резьбы.

3. Электрофизическая обработка - основана на использовании специфических явлений электрического тока: искра (электроискровая обработка), импульс (электроимпульсная обработка), дуга (электродуговая обработка).

Микротвёрдость - твёрдость отдельных участков микроструктуры материала. Измеряется вдавливанием алмазной пирамиды под нагрузкой менее 2 Н (200 гс). Размеры отпечатка определяют под микроскопом, а затем по специальным таблицам пересчитывают на т. н. число твёрдости — отношение нагрузки к площади поверхности отпечатка. Прибор для определения М. обеспечивает возможность выбора участка микроструктуры, где будет произведено вдавливание; благодаря этому, а также вследствие малых размеров отпечатка можно измерять М. кристаллов отдельных фаз или различных участков зерна. Данные о М. используют для изучения неоднородности распределения растворимых примесей по зерну, исследования пластической деформации, построения диаграмм фазового равновесия и т. д.

Модель — это объект или явление, в достаточной степени повторяющий свойства моделируемого объекта или явления (прототипа), существенные для целей конкретного моделирования, и опускающий несущественные свойства, в которых он может отличаться от прототипа.

Модуль упругости - величина, характеризующая упругие свойства материала. В случае малых деформаций, когда справедлив закон Гука, т. е. имеет место линейная зависимость между напряжениями и деформациями, М. у. представляют собой коэффициент пропорциональности в этих соотношениях. Одностороннему нормальному напряжению s , возникающему при простом растяжении (сжатии), соответствует в направлении растяжения модуль продольной упругости E (модуль Юнга). Он равен отношению нормального напряжения s к относительному удлинению e , вызванному этим напряжением в направлении его действия: $E = s/e$, и характеризует способность материала сопротивляться растяжению. Напряжённому состоянию чистого сдвига, при котором по двум взаимно перпендикулярным площадкам действуют только касательные напряжения t , соответствует модуль сдвига G . Модуль сдвига равен отношению касательного напряжения t к величине угла сдвига g , определяющего искажение прямого угла между плоскостями, по которым действуют касательные напряжения, т. е. $G = t/g$. Модуль сдвига определяет способность материала сопротивляться изменению формы при сохранении его объёма.

Надёжность изделия - свойство изделия сохранять значения установленных параметров функционирования в определённых пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования, технического обслуживания, хранения и транспортирования. Н. — комплексное свойство, которое в зависимости от назначения изделия и условий его эксплуатации может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость в отдельности или определённое сочетание этих

свойств как изделия в целом, так и его частей. Основное понятие, используемое в теории надёжности, — понятие отказа, т. е. утраты работоспособности, наступающей либо внезапно, либо постепенно.

Наклеп металлов и сплавов - изменение структуры и соответственно свойств металлов и сплавов, вызванное пластической деформацией при температуре ниже температуры рекристаллизации. Н. называется также технологический процесс создания упрочнённого состояния материала холодной поверхностной пластической деформацией. Явление Н. объясняется накоплением в металле части энергии деформации, которая расходуется на искажение кристаллической решётки, образование преимущественно ориентированных кристаллов (текстур), изменение дислокационной структуры, а также на увеличение удельного объёма металла в слое. Н. может быть результатом действия внешних деформирующих сил (деформационный Н.) или, реже, фазовых превращений (фазовый Н.). Н. сопровождается увеличением прочности и твёрдости и снижением пластичности материала.

Нанотехнология - междисциплинарная область фундаментальной и прикладной науки и техники, имеющая дело с совокупностью теоретического обоснования, практических методов исследования, анализа и синтеза, а также методов производства и применения продуктов с заданной атомарной структурой путём контролируемого манипулирования отдельными атомами и молекулами.

Научно-исследовательская работа (НИР) - комплекс теоретических и экспериментальных исследований, проводимых в обеспечение конструкторского задела перед развертыванием полномасштабных опытно-конструкторских разработок по созданию нового изделия. В ходе проведения НИР изыскиваются новые и перспективные конструктивные решения и базовые технологии в обеспечение создания новой и совершенствования (модернизации) существующей военной техники (вооружения), а также уточняются наиболее рациональные способы ее боевого применения и использования. При проведении НИР широкое применение находят предварительные и исполнительные модели, представляющие собой упрощенное воспроизведение опытного образца (или его составной части) в определенном масштабе, предназначенные для натурной и полунатурной проверки (моделирования) выбранных технических решений, заложенных в его конструкцию.

Научные исследования и опытно-конструкторские разработки (НИОКР) - полномасштабный комплекс теоретических и экспериментальных исследований, проводимых по созданию нового изделия.

Напряжение механическое - это мера внутренних сил, возникающих в деформируемом теле под влиянием внешних воздействий. Механическое напряжение в точке тела измеряется отношением упругой силы, возникающей в теле при деформации, к площади малого элемента сечения, перпендикулярного к этой силе. Различают две составляющие вектора механического напряжения:

- ~~Нормальное механическое напряжение~~ — приложено на единичную площадку сечения образца, по нормали к сечению.

- ~~Касательное механическое напряжение~~ — приложено на единичную площадку сечения образца, в плоскости сечения.

Обработка резанием - технологические процессы обработки металлов путём снятия стружки, осуществляемые режущими инструментами на металлорежущих станках с целью придания деталям заданных форм, размеров и качества поверхностных слоев. Основные виды: точение, строгание, сверление, развёртывание, протягивание, фрезерование и зубофрезерование, шлифование, хонингование и др.

Закономерности механической обработки рассматриваются как результат взаимодействия системы станок—инструмент — деталь (СИД). Любой вид обработки характеризуется режимом резания, представляющим собой совокупность следующих основных элементов: скорость резания v , глубина резания t и подача s . Скорость резания — скорость инструмента или заготовки в направлении главного движения, в результате которого происходит отделение стружки от заготовки, подача — скорость в направлении движения подачи.

Особо точный токарный станок (ОТТС) - металлорежущий станок для высокоточной (прецизионной) обработки деталей. Обработка на ОТТС. обеспечивает получение изделий с поверхностями правильной геометрической формы, с точным пространственным положением осей и низкой шероховатостью поверхности. Условиями для получения высокой точности обработки (в пределах *мкм*) является применение ответственных деталей и узлов повышенной точности, прецизионных и сверхпрецизионных подшипников качения, а также гидродинамических и гидро- и аэростатических подшипников и др.; снижение тепловых деформаций и вибраций; повышение жёсткости узлов; оснащение станков системами отвода стружки и тонкой фильтрации смазочно-охлаждающих жидкостей; высокая степень автоматизации управления станком, загрузки и выгрузки изделий. Особо важное значение при обработке имеет точность перемещения подвижных узлов, что обеспечивается применением высокоточных специальных базовых деталей, направляющих, основных элементов механизмов перемещения и подач, снижением трения в механизмах перемещения подвижных узлов и т.п.

Тепловые деформации заготовок, станины, приспособлений и др. деталей и узлов могут быть уменьшены путём удаления от станка источников нагрева, применения систем смазки со стабилизацией температуры, холодильных устройств в смазочно-охлаждающей системе и т.п. При обработке особо точных деталей такие станки устанавливают в помещении с постоянной температурой. Для устранения вибраций (особенно при большой частоте вращения шпинделей) вращающиеся части подвергаются тщательной динамической балансировке.

Остаточные напряжения - напряжения, остающиеся в твёрдом теле, подвергнутом какому-либо внешнему воздействию, а затем освобожденному от него. О. н. возникнет в том случае, когда внешние воздействия создают в теле не только упругую деформацию, но и пластическую.

Отклонение формы – отличие фактической формы тела от теоретической формы простого тела (цилиндра, конуса, шара). Характеризуются допустимыми отклонениями, т.е. допуском. Допуск — разность между наибольшим и наименьшим предельными значениями (размеров, массовой доли, массы), задаётся на геометрические размеры деталей, механические, физические и химические свойства. Назначается (выбирается) исходя из технологической точности или требований к изделию (продукту). Любое значение параметра, оказывающееся в заданном интервале, является допустимым. Допуск формы и расположения поверхностей указывается в виде условных обозначений (графически с числовым значением допуска) или текстом.

Плазменное напыление - нанесение вещества в дисперсном состоянии на поверхность изделий и полуфабрикатов потоком плазмы для сообщения им специальных физико-химических, механических, декоративных свойств или для восстановления дефектной поверхности.

Плазматрон - техническое устройство, в котором происходит образование и поддержание температуры плазмы используемой для обработки материалов или как источник света и тепла. Буквально, плазматрон означает — генератор плазмы.

Пластичность - свойство твердых тел:

- изменять под нагрузкой форму и размеры без образования разрывов и трещин; и
 - сохранять изменившиеся форму и размеры после удаления нагрузки.
-

Пластическая деформация - деформация, которая не исчезает после прекращения действия внешних сил. Основными механизмами сдвиговой пластической деформации кристаллических тел являются скольжение и двойникование. Скольжение-это такое перемещение одной части кристалла относительно другой, при котором кристаллическое строение обеих частей остается неизменным. В области сдвига кристаллическая решетка остается такой же, как и в обеих частях кристалла, и каждый атом в этой области перемещается на одинаковые расстояния, составляющие целое число периодов повторяемости решетки.

Плотность дислокаций – отношение суммарной длины всех дислокационных линий к объему, в котором они находятся. Пластическая деформация и термическая обработка приводят к увеличению плотности дислокаций, типичные значения которой для различных состояний материала могут составлять, см⁻²:

Монокристаллы особо чистых веществ	$10^2 \dots 10^4$
Отожженные обычные монокристаллы	$10^4 \dots 10^6$
Отожженные поликристаллические металлы	$10^7 \dots 10^8$
Металлы после холодного пластического деформирования	$10^9 \dots 10^{12}$

Поверхностное пластическое деформирование (ППД) - вид упрочняющей обработки, при котором не образуется стружка, а происходит пластическое деформирование тонкого поверхностного слоя заготовки. После ППД в результате наклепа упрочняется поверхностный слой, повышается износостойкость, стойкость к коррозионным воздействиям. Во многих случаях применением ППД удается повысить запасы прочности деталей, работающих при знакопеременных нагрузках, в 1,5-3 раза и увеличить срок службы деталей в десятки раз.

Поверхностный слой - тонкий слой вещества близ поверхности соприкосновения двух фаз (тел, сред), отличающийся по свойствам от веществ в объеме фаз. Особые свойства П. с. обусловлены сосредоточенным в нём избытком свободной энергии, а также особенностями его строения и состава.

Подача - относительное перемещение режущего инструмента и обрабатываемой на станке заготовки; один из основных параметров, характеризующих режим резания при обработке изделий на станках. П. позволяет последовательно распространить процесс резания на всю подлежащую обработке поверхность. Различают П. непрерывную (например, токарные, сверлильные, фрезерные станки) и прерывистую, или периодическую (например, строгальные и долбежные станки), прямолинейную (токарные, сверлильные, фрезерные, строгальные станки) и круговую (например, при вращении изделий в некоторых шлифовальных станках). П. измеряется в мм на 1 оборот заготовки или инструмента (станки токарной группы); в мм на 1 двойной ход стола, ползуна (строгальные станки); в мм/мин — минутная подача (фрезерные станки).

Поликристаллическое тело (поликристалл) - агрегат мелких кристаллов какого-либо вещества, иногда называемых из-за неправильной формы кристаллитами или кристаллическими зёрнами. Многие материалы естественного и искусственного происхождения (минералы, металлы, сплавы, керамики и т.д.) являются П. Свойства П. обусловлены свойствами составляющих его кристаллических зёрен, их средним размером, который колеблется от $1-2 \times 10^{-6}$ мкм до нескольких мм, кристаллографической

ориентацией зёрен и строением межзёренных границ. Если зёрна ориентированы хаотически, а их размеры малы по сравнению с размером П., то в П. не проявляется анизотропия физических свойств, характерная для монокристаллов. Если в П. есть преимущественная кристаллографическая ориентация зёрен, то П. является текстурированным и в этом случае обладает анизотропией свойств.

Полирование - отделочная обработка изделий для повышения класса чистоты их поверхности, доводки изделий до требуемых размеров, получения определённых свойств поверхностного слоя, а также для придания их поверхности декоративного блеска. П. представляет собой совокупность процессов пластической микродеформации и тонкого диспергирования поверхностного слоя обрабатываемого изделия, происходящих при воздействии на этот слой полировальными и доводочными материалами.

Предел прочности - механическое напряжение σ_0 , выше которого происходит разрушение материала. Поскольку при оценке прочности время нагружения образцов часто не превышает нескольких секунд от начала нагружения до момента разрушения, то его также называют условно-мгновенным пределом прочности, или хрупко-кратковременным пределом прочности.

Предел текучести - механическое напряжение σ_0 , дальше которого упругая деформация тела (исчезающая после снятия напряжения) переходит в пластическую (необратимую, когда геометрия тела не восстанавливается после снятия деформирующего напряжения).

Предел текучести соответствует площадке текучести материала. В случае, если такая площадка отсутствует, вместо σ_T используется напряжение $\sigma_{0,2}$ (читается: сигма ноль-два), которое соответствует напряжению, при котором остаточные деформации конструкции (пластические деформации) составляют 0,2% от длины испытываемого образца.

Прочность - способность материала сопротивляться разрушению при воздействии внешних сил, вызывающих деформацию и внутреннее напряжение в материале. Прочность измеряется по наибольшему напряжению, вызывающему разрушение материала при сжатии, изгибе и растяжении, (пределу прочности).

Разрушение - выход из строя конструктивных элементов. Разрушение может быть связано с неправильным выбором металла или сплава для данного вида применения, дефектами металла, ошибками в расчете конструкции или отклонениями рабочих условий от заданных при проектировании. Основные виды разрушения:

Вязкое разрушение. Разрушение пластичного материала наступает при его нагружении с превышением предела упругости. Металлический материал переходит в состояние пластической деформации (текучести), что приводит к т.н. вязкому разрушению. Разрушение такого рода могут вызывать чрезмерные напряжения растяжения, сжатия и сдвига.

Хрупкое разрушение. Хрупкому разрушению подвержены конструкции из металлических материалов с ограниченной пластичностью вследствие быстрого распространения в них трещин. Возникают же трещины обычно в локальных зонах высокой концентрации напряжений. Во избежание отказов такого рода необходимо использовать достаточно пластичные металлические материалы и проектировать конструкции так, чтобы в них не было зон концентрации напряжений.

Разупрочнение – процесс обратный упрочнению. При нагреве, например во время отжига, металла подвергнутого наклёпу, происходит его разупрочнение, вследствие развития процессов отжига, полигонизации, рекристаллизации.

Режимы обработки представляют собой совокупность следующих основных элементов: скорость резания v , глубина резания t и подача s . Скорость резания — скорость инструмента или заготовки в направлении главного движения, в результате которого происходит отделение стружки от заготовки, подача — скорость в направлении движения подачи. Например, при точении скоростью резания называется скорость перемещения обрабатываемой заготовки относительно режущей кромки резца (окружная скорость) в м/мин, подачей — перемещение режущей кромки резца за один оборот заготовки в мм/об. Глубина резания — толщина (в мм) снимаемого слоя металла за один проход (расстояние между обрабатываемой и обработанной поверхностями, измеренное по нормали). В сечении срезаемого слоя металла рассматриваются такие элементы резания (физические параметры): толщина срезаемого слоя и ширина срезаемого слоя; их величина при постоянных t и s зависит от главного угла в плане.

Режущий материал – материал для изготовления режущей части инструмента. Режущая способность Р.м. определяется свойствами материала, наиболее существенным показателем является красностойкость материала. Применяют следующие основные группы материалов: инструментальные стали (углеродистые, быстрорежущие, легированные), твёрдые сплавы, режущую керамику и сверхтвёрдые материалы. Твёрдые сплавы выпускаются в виде сменных многогранных пластин различной формы и размеров. Изготавливают также монолитные твердосплавные инструменты небольших размеров. Перспективным является применение сверхтвёрдых материалов — естественных и синтетических алмазов, кубического нитрида бора и др.

Резание металлов - технологические процессы обработки металлов путём снятия стружки, осуществляемые режущими инструментами на металлорежущих станках с целью придания деталям заданных форм, размеров и качества поверхностных слоев.

Резец - режущий инструмент, применяемый при обработке изделий на токарных, revolverных, расточных, карусельных, строгальных, долбёжных, зубострогальных и специальных станках. Р. представляет собой стержень, состоящий из головки с режущей частью и державки, которой Р. закрепляется на станке. По форме головки различают Р.: прямые, отогнутые, изогнутые, чашечные; по сечению державки — прямоугольные, квадратные, круглые. Конструктивно Р. могут выполняться с приваренной головкой или режущей пластинкой, с припаянной пластинкой, с направленной головкой, с головкой-вставкой, с механическим креплением пластинки и т. д. По назначению (виду обработки) различают Р.: проходные, подрезные, отрезные и прорезные, расточные, резьбонарезные, радиусные, фасонные и др.

Релаксация напряжений - процесс самопроизвольного уменьшения внутреннего напряжения с течением времени при неизменной деформации. Причиной релаксации напряжений является ползучесть материалов — медленная непрерывная пластическая деформация твёрдого тела под воздействием постоянной нагрузки или механического напряжения. Ползучести в той или иной мере подвержены все твёрдые тела — как кристаллические, так и аморфные.

Ротор в технике [от лат. *roto* — вращаю (сь)] - вращающаяся часть двигателей и рабочих машин, на которой расположены органы, получающие энергию от рабочего тела или отдающие её рабочему

телу. Р. двигателей связан с ведущим валом, Р. рабочих машин — с приводным валом. Р. выполняют в виде барабанов, дисков, колёс.

Система станок-инструмент-деталь (СИД) – техническая система, обеспечивающая функционирование процесса обработки и получение детали с требуемыми параметрами. Закономерности обработки металлов резанием рассматриваются как результат взаимодействия элементов системы станок—инструмент — деталь (СИД).

Скорость в механике, одна из основных кинематических характеристик движения точки, равная численно при равномерном движении отношению пройденного пути s к промежутку времени t , за который этот путь пройден, т. е. $v = s/t$. Скорость резания — скорость инструмента или заготовки в направлении главного движения, в результате которого происходит отделение стружки от заготовки. Например, при точении скоростью резания называется скорость перемещения обрабатываемой заготовки относительно режущей кромки резца (окружная скорость) в *м/мин*.

Сканирующий туннельный микроскоп (СТМ) - система образец + игла, к которым приложена разность потенциалов. Электроны из образца туннелируют на иглу, создавая таким образом туннельный ток. Величина этого тока экспоненциально зависит от расстояния образец-игла. Типичные значения 1-1000 пА при расстояниях около 1 Å.

В процессе сканирования игла движется вдоль образца, туннельный ток поддерживается стабильным за счёт действия обратной связи, и удлинение следящей системы меняется в зависимости от топографии поверхности. Такие изменения фиксируются, и на их основе строится карта высот. Ограничения на использование метода накладываются, во-первых, условием проводимости образца (поверхностное сопротивление должно быть не больше 20 МОм/см²), во-вторых, условием «глубина канавки должна быть меньше её ширины», потому что в противном случае может наблюдаться [туннелирование](#) с боковых поверхностей.

Смазочные материалы - вещества, обладающие смазочным действием. Применяются для смазки трущихся деталей машин и приборов, а также при обработке металлов давлением. В качестве С. м. используют жидкие масла преимущественно нефтяного происхождения, синтетические масла, пластичные смазки, твёрдые вещества (графит, дисульфид молибдена, полимеры с наполнителями), газообразные вещества (воздух, пары углеводородов, галогенопроизводные метана и др.) и поверхностно-активные вещества. По агрегатному состоянию, свойствам и назначению разделяются на группы и сорта.

Сплавы - материалы, имеющие металлические свойства и состоящие из двух или большего числа химических элементов, из которых хотя бы один является металлом. Многие металлические сплавы имеют один металл в качестве основы с малыми добавками других элементов. Самый распространенный способ получения сплавов - затвердевание однородной смеси их расплавленных компонентов. Существуют и другие методы производства - например, порошковая металлургия. В принципе, четкую границу между металлами и сплавами трудно провести, так как даже в самых чистых металлах имеются "следовые" примеси других элементов. Однако обычно под металлическими сплавами понимают материалы, получаемые целенаправленно добавлением к основному металлу других компонентов.

Станок (металлорежущий станок) - машина для обработки резанием металлических и др. материалов, полуфабрикатов или заготовок с целью получения из них изделий путём снятия стружки металлорежущим инструментом. М. с. являются основным видом оборудования в машиностроении,

приборостроении и др. отраслях промышленности. Совершенствование М. с. предопределяет научно-технический прогресс, развитие технологии и организации машиностроительного производства.

По специализации различают М. с. универсальные для выполнения разнообразных операций на изделиях широкой номенклатуры; широкого назначения для выполнения ограниченного числа операций на изделиях широкой номенклатуры; специализированные для обработки однотипных изделий разных размеров; специальные для обработки изделий одного типоразмера; агрегатные — специальные, состоящие из нормализованных деталей, узлов, силовых головок.

Структура (лат. structura - строение, расположение, порядок) - совокупность внутренних связей, строение, внутреннее устройство объекта. Иногда в определении понятия С. добавляют, что указанные внутренние связи устойчивы и что они обеспечивают целостность объекта и его тождественность самому себе. Подобное ограничение, по-видимому, излишне, так как в некоторых отраслях знания рассматриваются объекты с переменной, нестационарной и т.п. Понятие С. и родственные ему (такие, как связь, отношение, взаимодействие) играют важную роль в общей теории систем и при использовании системного подхода в различных областях деятельности; понятие С. тесно связано с понятием "функция".

Структура кристалла (кристаллическая структура) определяется расположением атомов в кристаллической решётке вещества. Основными параметрами, характеризующими кристаллическую структуру, некоторые из которых взаимосвязаны, являются следующие:

- тип кристаллической решётки (сингония, центрировка);
- число формульных единиц, приходящихся на элементарную ячейку;
- параметры элементарной ячейки (линейные размеры и углы);
- координаты атомов в ячейке;
- пространственная группа;
- координационные числа всех атомов.

Кристаллическая структура, будучи индивидуальной для каждого вещества, относится к его основным физико-химическим свойствам. Следует разделить [идеальный](#) и [реальный кристалл](#). Идеальный кристалл — это, по сути, математический объект, имеющий полную, свойственную ему симметрию, идеализированно ровные гладкие грани и т. д. Реальный кристалл всегда содержит различные дефекты внутренней структуры решетки, искажения и неровности на гранях и имеет пониженную симметрию многогранника вследствие специфики условий роста, неоднородности питающей среды, повреждений и деформаций. Реальный кристалл не обязательно обладает кристаллографическими гранями и правильной формой, но у него сохраняется главное свойство — закономерное положение атомов в кристаллической решётке.

Структурные дефекты (несовершенства) (от лат. defectus — недостаток, изъян), нарушения периодичности кристаллической структуры в реальных монокристаллах. В идеализированных структурах кристаллов атомы занимают строго определённые положения, образуя правильные трёхмерные решётки (кристаллические решётки). В реальных кристаллах (природных и искусственно выращенных) наблюдаются обычно различные отступления от правильного расположения атомов или ионов (или их групп). Такие нарушения могут быть либо атомарного масштаба, либо макроскопических размеров, заметные даже невооружённым глазом. Помимо статических дефектов, существуют отклонения от идеальной решётки другого рода, связанные с тепловыми колебаниями частиц, составляющих решётку (динамические дефекты,

Твёрдость - сопротивление материала вдавливанию или царапанию. Т. не является физической постоянной, а представляет собой сложное свойство, зависящее как от прочности и пластичности материала, так и от метода измерения. Наиболее часто для измерения Т. металлов пользуются методом вдавливания. При этом величина твёрдости равна нагрузке, отнесённой к поверхности отпечатка, или обратно пропорциональна глубине отпечатка при некоторой фиксированной нагрузке.

Отпечаток обычно производят шариком из закалённой стали (методы Бринелля, Роквелла), алмазным конусом (метод Роквелла) или алмазной пирамидой (метод Виккерса, измерение микротвёрдости). Реже пользуются динамическими методами измерения, в которых мерой твёрдости является высота отскакивания стального шарика от поверхности изучаемого металла (например, метод Шора) или время затухания колебания маятника, опорой которого является исследуемый металл.

Технология (от греч. *téchne* — искусство, мастерство, умение и греч. *логия* — изучение) — совокупность методов и инструментов для достижения желаемого результата; способ преобразования данного в необходимое. Технология - в широком смысле - объём знаний, которые можно использовать для производства товаров и услуг из экономических ресурсов. Технология - в узком смысле - способ преобразования вещества, энергии, информации в процессе изготовления продукции, обработки и переработки материалов, сборки готовых изделий, контроля качества, управления. Технология включает в себе методы, приемы, режим работы, последовательность операций и процедур, она тесно связана с применяемыми средствами, оборудованием, инструментами, используемыми материалами.

Технологический процесс - совокупность последовательно выполняемых операций, образующих вместе единый процесс преобразования исходных материалов в нужный продукт.

Термическая обработка (термообработка) металлов - процесс обработки изделий из металлов и сплавов путём теплового воздействия с целью изменения их структуры и свойств в заданном направлении. Это воздействие может сочетаться также с химическим, деформационным, магнитным и др. Классификация видов Т. о. основывается на том, какого типа структурные изменения в металле происходят при тепловом воздействии. Т. о. металлов подразделяется на собственно термическую, заключающуюся только в тепловом воздействии на металл, химико-термическую, сочетающую тепловое и химическое воздействия, и термомеханическую, сочетающую тепловое воздействие и пластическую деформацию. Собственно термическая обработка включает следующие виды: отжиг 1-го рода, отжиг 2-го рода, закалку без полиморфного превращения и с полиморфным превращением, старение и отпуск.

Точение (токарная обработка) - одна из основных операций обработки резанием, выполняемая на металлорежущих станках и деревообрабатывающих станках токарной группы, обычно при вращательном движении изделия и поступательном движении резца.

Трение - процесс взаимодействия твёрдых тел при их относительном движении (смещении) либо при движении твердого тела в жидкой или газообразной среде. По-другому называется фрикционным взаимодействием. Изучением процессов трения занимается раздел физики, который называется механикой фрикционного взаимодействия, или трибологией.

При наличии относительного движения двух контактирующих тел силы трения, возникающие при их взаимодействии, можно подразделить на:

- **Трение скольжения** — сила, возникающая при поступательном перемещении одного из контактирующих/взаимодействующих тел относительно другого и действующая на это тело в направлении, противоположном направлению скольжения;

- **Трение качения** — момент сил, возникающий при качении одного из двух контактирующих/взаимодействующих тел относительно другого и противодействующий вращению движущегося тела;

- **Трение верчения** — сила, возникающая при верчении одного из двух контактирующих/взаимодействующих тел относительно другого и действующая на первое тело в направлении, противоположном направлению верчения;

При отсутствии относительного движения двух контактирующих тел и наличии сил, стремящихся осуществить такое движение, в ряде ситуаций возникает

- **Трение покоя** — сила, возникающая между двумя контактирующими телами и препятствующая возникновению относительного движения. Эту силу необходимо преодолеть для того, чтобы привести два контактирующих тела в движение друг относительно друга. Она действует в направлении, противоположном направлению возможного движения.

По физике взаимодействия трение принято разделять на:

- **Сухое**, когда взаимодействующие твердые тела не разделены никакими дополнительными слоями/смазками — очень редко встречающийся на практике случай. Характерная отличительная черта сухого трения — наличие значительной силы трения покоя.

- **Жидкостное (вязкое)**, при взаимодействии тел, разделённых слоем жидкости или газа (смазки) различной толщины — как правило, встречается при трении качения, когда твёрдые тела погружены в жидкость; см. также вязкость.

- **Смешанное**, когда область контакта содержит участки сухого и жидкостного трения;

- **Граничное**, когда в области контакта могут содержаться слои и участки различной природы (окисные пленки, жидкость и т. д.) — наиболее распространенный случай при трении скольжения.

В связи со сложностью физико-химических процессов, протекающих в зоне фрикционного взаимодействия, процессы трения принципиально не поддаются описанию с помощью методов классической механики.

Ударная вязкость - способность материала поглощать механическую энергию в процессе деформации и разрушения под действием ударной нагрузки. Обычно оценивается работой, необходимой для деформации и разрушения призматического образца с односторонним поперечным надрезом при испытании на ударный изгиб, условно отнесённой к сечению образца в основании надреза (дж/м^2 , нм/м^2 , $\text{кгс}\times\text{м/см}^2$); обозначается символом a_n . У. в. — одна из наиболее важных прочностных характеристик металла.

Усталость материалов - изменение механических и физических свойств материала под длительным действием циклически изменяющихся во времени напряжений и деформаций. Изменение состояния материала при усталостном процессе отражается на его механических свойствах, макроструктуре, микроструктуре и субструктуре. Эти изменения протекают по стадиям и зависят от исходных свойств, вида напряжённого состояния, истории нагружения и влияния среды. На определённой стадии начинаются необратимые явления снижения сопротивления материала разрушению, характеризующиеся как усталостное повреждение. Сначала в структурных составляющих материала и по границам их сопряжения (зёрна поликристаллического металла, волокна и матрица композитов, молекулярные цепи полимеров) образуются микротрещины, которые на дальнейших стадиях перерастают в макротрещины либо приводят к окончательному разрушению элемента конструкции или образца для механических испытаний.

Усталостное разрушение происходит в деталях, подвергающихся переменным, циклическим нагрузкам, когда величина нагрузки в каждом цикле очень мала, но число циклов достигает миллионов и десятков миллионов. В таких условиях работают рельсы, оси вагонов, лонжероны лопастей винта вертолета и многие другие детали конструкций.

Упрочнение в технологии металлов - повышение сопротивляемости материала заготовки или изделия разрушению или остаточной деформации. У. характеризуется степенью У. — показателем относительного повышения значения заданного параметра сопротивляемости материала разрушению или остаточной деформации по сравнению с его исходным значением в результате упрочняющей обработки, а

также (в ряде случаев) глубиной У. (толщиной упрочнённого слоя). У. обычно сопровождается снижением пластичности. Поэтому практически выбор способа и оптимального режима упрочняющей обработки определяется максимальным повышением прочности материала при допустимом снижении пластичности, что обеспечивает наибольшую конструкционную прочность.

Упрочняющие технологии применяются для упрочнения материала заготовок и изделий, что достигается механическими, термическими, химическими и др. воздействиями, а также комбинированными способами (химико-термическими, термомеханическими и др.). Наиболее распространённый вид упрочняющей обработки – поверхностное пластическое деформирование (ППД) – простой и эффективный способ повышения несущей способности и долговечности деталей машин и частей сооружений, в особенности работающих в условиях знакопеременных нагрузок (оси, валы, зубчатые колёса, подшипники, поршни, цилиндры, сварные конструкции, инструменты и т.п.).

Упругая деформация - деформация, которая исчезает при снятии нагрузки. Для этого деформация не должна превосходить некоторого предела, называемого пределом упругости; в противном случае в теле наблюдаются остаточные деформации.

Фаза - в термодинамике - однородная по составу и свойствам часть термодинамической системы, отделенная от других фаз поверхностями раздела, на которых скачком изменяются некоторые свойства системы.

Фазово-частотная характеристика (ФЧХ) - характеристика линейной системы, выражающая зависимость сдвига по фазе между гармоническими колебаниями на выходе и входе этой системы от частоты гармонических колебаний на входе. ФЧХ используется главным образом для оценки фазовых искажений формы сложного сигнала, вызываемых неодинаковой задержкой во времени его отдельных гармонических составляющих при их прохождении по цепи. Для подавляющего большинства цепей (т. н. минимально-фазовые цепи) ФЧХ однозначно связана с амплитудно-частотной характеристикой.

Фазовое превращение (фазовый переход) в широком смысле – переход вещества из одной фазы в другую при изменении внешних условий – температуры, давления, магнитного и электрического полей и т.д.; в узком смысле – скачкообразное изменение физических свойств при непрерывном изменении внешних параметров.

Фрезерование в металлообработке - процесс резания металлов и др. твёрдых материалов фрезой. Ф. применяется для обработки плоских и фасонных поверхностей (в т. ч. резьбовых поверхностей, зубчатых и червячных колёс) и осуществляется на фрезерных станках. Главное движение при Ф. — вращение инструмента, движение подачи — поступательное перемещение заготовки; скорость резания равна окружной скорости наиболее удалённых от оси фрезы точек её зубьев.

Химико-термическая обработка металлов, совокупность технологических процессов, приводящих к изменению химического состава, структуры и свойств поверхности металла без изменения состава, структуры и свойств его сердцевидных зон. Осуществляется с помощью диффузионного насыщения поверхности различными элементами при повышенных температурах. Выбор элемента (или комплекса элементов) определяется требуемыми свойствами поверхности детали. Насыщение производят углеродом

(цементация), азотом (азотирование), азотом и углеродом (нитроцементация, цианирование), металлами (см. Диффузионная металлизация), бором (борирование), кремнием (силицирование) и т.д.

Хрупкость - свойство материала разрушаться при небольшой (преимущественно упругой) деформации под действием напряжений, средний уровень которых ниже предела текучести. Образование хрупкой трещины и развитие процесса хрупкого разрушения связано с образованием малых зон пластической деформации. Относительная доля упругой и пластической деформации при хрупком разрушении зависит от свойств материала (характера межатомных или межмолекулярных связей, микро- и кристаллической структуры) и от условий его работы.

Хрупкое разрушение - разрушение без следа макропластических деформаций материала детали. Хрупкому разрушению подвержены конструкции из металлических материалов с ограниченной пластичностью вследствие быстрого распространения в них трещин. Возникают же трещины обычно в локальных зонах высокой концентрации напряжений. Во избежание отказов такого рода необходимо использовать достаточно пластичные металлические материалы и проектировать конструкции так, чтобы в них не было зон концентрации напряжений.

Частота колебаний - количественная характеристика периодического колебательного процесса, равная числу полных колебаний, совершаемых в единицу времени. Частота колебаний:
- обратно пропорциональна периоду колебаний;
- измеряется в герцах.

Шероховатость поверхности - совокупность неровностей, образующих микрорельеф поверхности детали. Возникает главным образом вследствие пластической деформации поверхностного слоя заготовки при её обработке из-за неровностей режущих кромок инструмента, трения, вырывания частиц материала с поверхности заготовки, вибрации заготовки и инструмента и т.п. Ш. п. — важный показатель в технической характеристике изделия, влияющий на эксплуатационные свойства деталей и узлов машин — износостойкость трущихся поверхностей, усталостную прочность, коррозионную устойчивость, сохранение натяга при неподвижных посадках и т.п. Требования к Ш. п. устанавливают, исходя из функционального назначения поверхностей деталей и их конструктивных особенностей.

Шлифование - обработка поверхностей заготовок абразивным инструментом. Производится на шлифовальных станках, на металлорежущих станках других групп с помощью специальных приспособлений (например, шлифовальных головок), вручную. По скорости вращения абразивного инструмента различают обычное Ш. — окружная скорость инструмента около 20 м/сек и скоростное — окружная скорость выше 50 м/сек. Ш. позволяет изготавливать металлические детали с точностью до 1-го класса и получать поверхности до 10-го класса шероховатости. Ш. широко применяется при обработке наружных и внутренних плоских, цилиндрических, конических и фасонных поверхностей заготовок из металлов, пластмасс, керамики, ферритов, камня, дерева и т.д.

Шпиндель - рабочий вал металлорежущего станка. На Ш. закрепляется инструмент (фреза, сверло, шлифовальный круг и т.п.) или обрабатываемое изделие. К Ш. предъявляются высокие требования по точности вращения, существенно влияющей на точность обработки. Поэтому их устанавливают на подшипниках качения высокого класса точности или подшипниках скольжения, а особо быстроходные Ш. внутришлифовальных станков (частота вращения до 100000 об/мин) — на подшипниках скольжения с воздушной смазкой. Привод Ш. осуществляется через зубчатую или ремённую передачу, а также непосредственно от встроенного электродвигателя или воздушной турбинки.

Энергия - скалярная физическая величина, являющаяся единой мерой различных форм движения материи и мерой перехода движения материи из одних форм в другие. Энергия - общая количественная мера движения и взаимодействия всех видов материи. Э. в природе не возникает из ничего и не исчезает; она только может переходить из одной формы в другую. Понятие Э. связывает воедино все явления природы.

Лабораторный практикум.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1.

Экспериментальное исследование влияния процесса обкатывания шаровым или роликовым индентором на качество поверхностного слоя деталей машин, изготавливаемых из стали, чугуна и цветного металла.

Цель работы

В лабораторной работе экспериментально устанавливается влияние режимов обкатывания поверхностей инструментом (обкатником) на один из параметров состояния поверхностного слоя детали, а именно шероховатость. Снятие цифровой и графической информации состояния микрогеометрии поверхностного слоя осуществляется на профилографе-профилометре. По графической информации или замерам точными измерительными инструментами линейных величин обработанной и исходной поверхностей выявляется влияние режимов обкатывания на точность обработки.

В процессе выполнения работы студенты проводят:

- Исследование зависимости микрогеометрии обкатанной поверхности от величины усилия давления деформирующего элемента (шара, ролика) в очаге деформации.
- Исследование зависимости микрогеометрии обкатанной поверхности от величины оборотной подачи деформирующего элемента (шара, ролика) в очаге деформации.
- Исследование зависимости микрогеометрии обкатанной поверхности от микрогеометрии исходной (точной) поверхности.
- Исследование зависимости микрогеометрии обкатанной поверхности от скорости процесса обкатывания.
- Исследование зависимости микрогеометрии обкатанной поверхности от размера деформирующего элемента (шара, ролика).
- Исследование зависимости изменения микротвердости исходной и обкатанной поверхности (градиент наклепа) от величины усилия давления деформирующего элемента (шара, ролика) в очаге деформации.
- Исследование зависимости изменения микротвердости исходной и обкатанной поверхности (градиент наклепа) от величины оборотной подачи.
- Исследование зависимости изменения микротвердости исходной и обкатанной поверхности (градиент наклепа) от размера деформирующего элемента (шара, ролика).
- Исследование зависимости формы очага деформации от величины усилия давления деформирующего элемента (шара, ролика) на обрабатываемую поверхность.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2.

Экспериментальное исследование влияния процесса выглаживания алмазом на качество поверхностного слоя деталей машин, изготавливаемых из стали, чугуна и цветного металла.

Цель работы

В лабораторной работе экспериментально устанавливается влияние режимов выглаживания алмазным выглаживателем на шероховатость обрабатываемой поверхности. Информация о микрогеометрии поверхности предварительно обточенной, а затем выглаженной, снимается на профилометре - профилографе.

По результатам экспериментальных данных строятся графики. На основании полученных профилограмм представляется возможность сделать вывод об изменении линейных размеров обработанной поверхности.

В процессе выполнения работы студенты проводят:

- Исследование зависимости микрогеометрии выглаженной поверхности от величины усилия давления деформирующего элемента (алмаза) в очаге деформации.
- Исследование зависимости микрогеометрии выглаженной поверхности от величины оборотной подачи деформирующего элемента (алмаза) в очаге деформации.
- Исследование зависимости микрогеометрии выглаженной поверхности от микрогеометрии исходной (точеной) поверхности.
- Исследование зависимости микрогеометрии выглаженной поверхности от скорости процесса выглаживания.
- Исследование зависимости микрогеометрии выглаженной поверхности от величины радиуса сферы деформирующего элемента (алмаза).
- Исследование зависимости изменения микротвердости исходной и выглаженной поверхности (градиента наклепа) от величины усилия давления деформирующего элемента (алмаза) в очаге деформации.
- Исследование зависимости изменения микротвердости исходной и выглаженной поверхности (градиента наклепа) от величины оборотной подачи.
- Исследование зависимости изменения микротвердости исходной и выглаженной поверхности (градиента наклепа) от величины радиуса сферы деформирующего элемента (алмаза).
- Исследование зависимости формы очага деформации от величины усилия давления деформирующего элемента (алмаза) на обрабатываемую поверхность.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3.

Экспериментальное исследование процессов формообразования регулярных микрорельефов на поверхностях деталей машин, изготавливаемых из стали, чугуна и цветного металла методами виброобработки.

Цель работы

В лабораторной работе экспериментально устанавливается влияние режимов вибровыглаживания и вибронакатывания на микрогеометрию обрабатываемой поверхности. Информация о микрогеометрии поверхности предварительно обточенной, а затем обработанной вибровыглаживанием и вибронакатыванием, снимается на профилометре - профилографе.

В процессе выполнения работы студенты проводят:

- Исследование процесса формообразования регулярных микрорельефов (РМР) на поверхностях деталей машин, обработанных вибровыглаживанием осциллирующим деформирующим элементом (алмазом).
- Исследование процесса формообразования регулярных микрорельефов (РМР) на поверхностях деталей машин, обработанных виброобкатыванием осциллирующим деформирующим элементом (шариком).
- Исследование процесса формообразования регулярных микрорельефов (РМР) на поверхностях деталей машин, обработанных вибровыглаживанием в плоско-параллельном вращательном движении деформирующего элемента (алмаза).
- Исследование процесса формообразования регулярных микрорельефов (РМР) на поверхностях деталей машин, обработанных виброобкатыванием в плоско-параллельном вращательном движении деформирующего элемента (шарика).

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4.

Экспериментальное исследование процессов формообразования регулярного микрорельефа (РМР) на поверхностях деталей машин, изготовленных из стали, чугуна и цветного металла, методами виброударной обработки.

Цель работы

В лабораторной работе экспериментально устанавливается влияние режимов виброударной обработки на микрогеометрию обрабатываемой поверхности. Информация о микрогеометрии поверхности предварительно обточенной, а затем обработанной виброударным способом, снимается на профилометре - профилографе.

В процессе выполнения работы студенты проводят:

- Исследование влияния силы удара на формообразование регулярного микрорельефа поверхности детали при ударном вибронакатывании.
- Исследование влияния величины оборотной подачи ударного элемента (шарика) и скорости вращения детали на формообразование регулярного микрорельефа поверхности при ударном вибронакатывании.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5.

Экспериментальное исследование процесса суперфиниширования поверхностей деталей машин, изготовленных из стали, чугуна и цветного металла.

Цель работы

В лабораторной работе экспериментально устанавливается влияние режимов суперфиниширования на шероховатость обрабатываемой поверхности. Информация о микрогеометрии поверхности предварительно обточенной, а затем обработанной суперфинишированием, снимается на профилометре - профилографе.

В процессе выполнения работы студенты проводят:

- Исследование влияния относительной скорости детали и инструмента (абразивного или алмазного бруска) на производительность процесса обработки при суперфинишировании.
- Исследование влияния режима обработки абразивными и алмазными брусками на качество поверхностного слоя (микрогеометрию и микротвердость) в процессах суперфиниширования.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 6.

Экспериментальное исследование процессов поверхностного и объемного дорнования отверстий деталей, изготовленных из стали, чугуна и цветного металла.

Цель работы

В лабораторной работе экспериментально устанавливается влияние условий дорнования на размеры и шероховатость обрабатываемой поверхности. Информация о микрогеометрии поверхности снимается на профилометре - профилографе.

В процессе выполнения работы студенты проводят:

- Исследование влияния натяга при дорновании на размеры и шероховатость обработанного отверстия.
- Исследование влияния режима и обрабатываемого материала на размеры и шероховатость обработанного отверстия.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 7.

Разработка математической модели гашения вибраций с помощью электромагнитного вибратора с обратной связью по скорости относительного перемещения детали и инструмента и компьютерный анализ этой модели.

Цель работы

В лабораторной работе разрабатывается математическая модель гашения вибраций и устанавливается влияние параметров модели на относительные колебания детали и инструмента.

В процессе выполнения работы студенты проводят:

- Разработку математической модели гашения вибраций.
- Анализ параметров, учитываемых в модели.
- Исследование влияния параметров модели.
- Построение графиков относительных колебаний детали и инструмента.
- Компьютерный анализ модели.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 8.

Практическая работа с датчиками для измерения особо точных абсолютных и относительных перемещений: пьезокерамических, световолоконных, вихретоковых. Устройство, схемы подключения, тарировка.

Цель работы

В лабораторной работе изучаются принципы действия, области применения и осваивается практическая работа с пьезокерамическими, световолоконными и вихретоковыми датчиками.

В процессе выполнения работы студенты проводят:

- Изучение принципов действия пьезокерамических, световолоконных, вихретоковых датчиков для измерения особо точных абсолютных и относительных перемещений.
- Изучение устройства пьезокерамических, световолоконных, вихретоковых датчиков для измерения особо точных абсолютных и относительных перемещений.
- Изучение схем подключения пьезокерамических, световолоконных, вихретоковых датчиков для измерения особо точных абсолютных и относительных перемещений.
- Тарировку пьезокерамических, световолоконных, вихретоковых датчиков для измерения особо точных абсолютных и относительных перемещений.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 9.

Измерение дисбаланса шпинделя особо точного станка в собственных аэростатических опорах. Балансировка станка с применением компьютерной технологии.

Цель работы

В лабораторной работе измеряется дисбаланс шпинделя особо точного станка и проводится балансировка с применением компьютерной технологии.

В процессе выполнения работы студенты проводят:

- Измерение первоначального дисбаланса шпинделя особо точного станка в собственных аэростатических опорах.
- Расчет величины и угла установки балансировочных грузов с помощью компьютерной программы.
- Установку балансировочных грузов на шпиндель особо точного станка.
- Измерение остаточного дисбаланса шпинделя особо точного станка.

По результатам выполнения лабораторных работ составляется отчет и проводится защита выполненной работы.

Список обязательной и дополнительной литературы.

А. Обязательная литература

- 1) Андреев Г.С. Контактные напряжения при периодическом резании. //Вестник машиностроения, 1969, № 8, С.65-68.
- 2) Апраксин В.И. Определение сил, действующих в процессе резания при отделении тонких стружек. Труды Ленинградского политехнического института. - № 191, 1957, - С. 192-201.
- 3) Арзамасов Б.Н. и др. Материаловедение. — М.: Машиностроение, 1986. — 384 с.
- 4) Геллер Ю.А., Рахштадт А.Г. Материаловедение. — М.: Металлургия, 1989. — 456 с.
- 5) Дальский А.М. и др. Технология конструкционных материалов. — М.: Машиностроение, 1985. — 448 с.
- 6) Евстигнеев М.И. и др. Технология производства двигателей летательных аппаратов. — Машиностроение, 1982. — 260 с.
- 7) Игнатов М.Г., Козлов В.Н., Перминов А.Е. Технологические процессы изготовления деталей из цементуемых закаливаемых сталей //Машиностроитель, 1991, №2.
- 8) Игнатов М.Г., Мамонова Ф.С., Перминов А.Е. Структурные превращения в стали 12Х2Н4А при ленточном шлифовании //Металловедение и термическая обработка металлов, 1979, №1.
- 9) Козлов В.Н., Перминов А.Е. Уменьшение фреттинг-коррозии стальных деталей //Машиностроитель, 1989, №10.
- 10) Лахтин Ю.М., Арзамасов Б.Н. Химико-термическая обработка металлов. — М.: Металлургия, 1985. — 256 с.
- 11) Мазальский В.Н. Суперфинишные станки. — Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1988. — 127 с.
- 12) Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием. Справочник. — М.: Машиностроение, 1987. — 328 с.
- 13) Перминов А.Е. Технологические методы поверхностного упрочнения деталей авиационных двигателей и агрегатов: Учебное пособие. — М.: Изд-во "МАТИ"-РГТУ "ЛАТМЭС", 1999. —64 с., ил.
- 14) Проников А.С., Перминов А.Е. Методика расчета долговечности при изнашивании зубьев цилиндрических эвольвентных прямозубых колес //Надежность и контроль качества, 1973, №12.
- 15) Рыковский Б.П. и др. Местное упрочнение деталей поверхностным наклепом. — М.: Машиностроение, 1985. — 152 с.
- 16) Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. — М.: Машиностроение, 2002. — 300 с.
- 17) Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.1/Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1985. — 656 с.
- 18) Сулима А.М. и др. Основы технологии производства газотурбинных двигателей. — М.: Машиностроение, 1996. — 486 с.
- 19) Сулима А.М. и др. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. — М.: Машиностроение, 1988. — 240 с.
- 20) Тамбулатов Б.Я. Доводочные станки. — М.: Машиностроение, 1980. — 160 с.
- 21) Хворостухин Л.А. и др. Технология поверхностного упрочнения деталей летательных аппаратов. Учебное пособие; МАТИ. — М., 1975. —104 с.
- 22) Шнейдер Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом. М.: Машиностроение, 1982. — 260 с.

Б. Дополнительная литература

- 1.) Армарего И.Дж., Браун Р.Х. Обработка металлов резанием.- М.: Машиностроение (пер. с англ.), 1977,- 325 с.

- 2.) Армарего И.Дж. Моделирование с использованием компьютера общеизвестных операций обработки резанием для предсказания силы и мощности резания// Пер. из журнала CIRP. - 1985. - т. 34. - № 1. - С. 65-69.
- 3.) Атопов В.И., Сердобинцев Ю.П., Славин О.К. Моделирование контактных напряжений. - М.: Машиностроение, 1988. - 271 с.
- 4.) Баласаньян В.С. Влияние дисбаланса на образование формы поверхности при высокоточной токарной обработке.- М.,1985.Деп. во ВНИИТЭМР 23.04.85, № 165 МШ - 85 Деп.
- 5.) Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. М.: Мир. 1974. 464 с.
- 6.) Биргер А.И. и др. Расчет на прочность деталей машин. -М.: Машиностроение, 1993, - 640 с.
- 7.) Браун С.А. Практический метод оценки сил, возникающих при механической обработке в зависимости от площади контакта детали и стружки.// Пер. из журнала CIRP. - 1983. - т. 32. - № 2. - С. 91-95.
- 8.) Браун Э.Д., Евдокимов Ю.А., Чичинадзе А.В. Моделирование трения и изнашивания в машинах. М.: Машиностроение, 1982, - 192 с.
- 9.) Броек Д. Основы механики разрушения. М.: Высшая школа,1980,368 с.
- 10.) Бузухов Н.И., Лужин О.В. Приложение методов теорий упругости и пластичности к решению инженерных задач.- М.: Высшая школа, 1974,- 200 с.
- 11.) Виноградов А.А., Чапалюк В.П. Контактные характеристики при резании стали 45.// Сверхтвердые материалы. - 1980. - № 1. - С. 49-54.
- 12.) Вопросы физико-химической механики процессов трения и резания.- Иваново: 1980,- 70 с.
- 13.) Галин Л.А. Контактные задачи теории упругости. М.: Гостехтеориздат,1953, - 264 с.
- 14.) Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. - М.: Мир, 1989, - 478 с.
- 15.) Екобори Т. Физика и механика разрушения и прочности твердых тел. - М.: Металлургия.1971. - 264 с.
- 16.) Иванова В.С. Разрушение металлов. - М.: Металлургия,1979, 166 с.
- 17.) Ионов В.Н., Селиванов В.В. Динамика разрушения деформируемого тела. – М.: Машиностроение, 1987, - 272 с.
- 18.) Качанов Л.М. Основы механики разрушения. - М.: Наука, 1974, - 312 с.
- 19.) Кудинов В.А. Динамика станков. - М.: Машиностроение, 1967, 359 с.
- 20.) Кудинов В.А. Системность и диалектика в динамике технологических процессов и машин//СТИН, № 1, 2000, - С. 5 – 9.
- 21.) Кузнецов В.Д. Физика резания и трения металлов и кристаллов. - М.: Наука, 1977, - 310 с.
- 22.) Левит М.Е., Рыженков В.М. Балансировка деталей и узлов. М.: Машиностроение, - 1986,- 248 с.
- 23.) Ленк А., Ренитц Ю. Механические испытания приборов и аппаратов.- М.: Мир, 1976,-272 с.
- 24.) МаксUTOва Т.Д., Олехвер А.И., Смирнов Г.А., Шихобалов С.П. Исследование контактных напряжений оптическим методом с применением стеклянных моделей инструмента // Труды 5-ой Всесоюзной конференции: Поляризационно-оптический метод исследования напряжений. Л.: ЛГУ, 1966. - С. 380 - 386.
- 25.) Основы балансировочной техники, в 2-х томах, -т. 2. Уравновешивание жестких роторов и механизмов / Под ред. В.А.Щепетильникова. -М.: Машиностроение, 1975.- 679 с.
- 26.) Папин В.Е. и др. Структурные уровни твердых тел. - Новосибирск: Наука, 1985, - 229 с.
- 27.) Парис. П, Си Д. Анализ напряженного состояния около трещины. В кн. Прикладные вопросы вязкости разрушения. - М.: Мир, 1968, С. 34 -39.
- 28.) Партон В.З., Борисковский В.Г. Динамика хрупкого разрушения. М.: Машиностроение, - 1988, - 240 с.
- 29.) Позняк Г.Г., Матвейкин В.В. Экспериментальное исследование рассеяния энергии при стружкообразовании. В кн. Исследование и расчет машин и сооружений. - М.: УДН, 1975, С. 116 - 119.

- 30.) Позняк Г.Г., Хамис Яхья. Влияние дисбаланса на форму обработанной поверхности при тонком точении // Материалы научно-технической конференции, посвященной 25-летию кафедры технологии машиностроения УДН. М.: УДН, 1988. - С. 51 - 58.
- 31.) Позняк Г.Г., Потапов С.П. Разработка и исследование датчика абсолютных колебаний. РУДН, М.: деп. в ВИНТИ 10.02.94, № 376-В94, 11 с.
- 32.) Позняк Г.Г., Азаров В.А., Хамис Яхья. Математическая и физическая модели отклонений формы поверхности при точении на особо точных станках. // СТИН, № 1, 2000, С. 20 - 23.
- 33.) Позняк Г.Г. Жедь О.В., Кошеленко А.С., Рогов В.А., Федоров В.Л. Математическая и поляризационно-оптическая модели напряжений в режущем клине. Вестник РУДН, специальный выпуск ИНЖЕНЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, № 1, - М.: РУДН, 2000, С.35-39.
- 34.) Розенберг А.М., Хворостухин Л.А. Твердость и напряжения в пластически деформированном теле. Ж.Т.Ф., т.24, 1955, - С. 67-83.
- 35.) Розенберг А.М., Смирнов-Аляев Г.А. Анализ пластической деформации металлов методом микроструктурных измерений.// Инженерный сборник. Т.10, 1951, - С. 3-16.
- 36.) Скрильтон Р.Ф., Тедж Н.Л. Пластическое течение поверхностных слоев металла при резании и штамповке // ВЦП. - 1976. - № Л-4187. - 18 с.
- 37.) Смирнов-Аляев Г.А., Розенберг В.М. Метод микроструктурных измерений пластической деформации.//Заводская лаборатория. Т. 17, вып. 11, 1951, - С. 1343-1352.
- 38.) Старков В.К. Дислокационные представления о резании металлов. - М.: Машиностроение, 1979, - 158 с.
- 39.) Устинов А.П. Определение статического дисбаланса вращающегося ротора в общем случае его неуравновешенности// Теория и практика уравнивания машин и приборов /Под ред. В.А.Щепетильникова. - М.: Машиностроение, 1970, - С. 95-103.
- 40.) Физико-химическая механика контактного взаимодействия в процессе резания металлов /Отв. Ред. Гордон М.Б. - Чебоксары, 1984. - 122 с.
- 41.) Хеккель К. Техническое применение механики разрушения. М.: Металлургия, - 1974, - 64 с.
- 42.) Хусу А.П., Витенберг Ю.А., Пальмов В.А. Шероховатость поверхностей. -М.: Наука, 1975. - 343 с.
- 43.) Цифровые балансировочные станки /ВЦП. - № М-8420. - 27 с. - пер. Судзуки М. И др. из журн.: National Technical Report. - 1983. - Vol/ 29/ - № 4. - Р. 598-606.
- 44.) Экспериментальная механика. Под ред. Кобаяси А.-М.: Мир, 1980.
- 45.) Ящерицын М.И. и др. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах. - Минск: Высшая школа, 1990, - 512 с.

Методические указания для студента.

После изучения данного курса, студент должен:

Должен знать: системный подход в решении актуальных задач повышения долговечности деталей и узлов машин на базе современных методов и средств поверхностной обработки металлов; основные методы упрочнения поверхностей различных типов деталей для достижения требуемого качества изделия.

Должен уметь: выбирать оптимальные технологические методы обработки для обеспечения необходимого качества поверхностного слоя; моделировать и исследовать на компьютерах модели отклонений формы и размеров.

Иметь представление: о технологических возможностях и области эффективного применения упрочняющих методов, повышающих требуемые эксплуатационные свойства деталей; о причинах отклонений формы и размеров обработанных деталей от требуемых в нанометрическом диапазоне;

Примерный порядок изучения темы:

- Изучите тему по материалам лекций.
- Изучите дополнительный материал по данной теме из рекомендованных источников (основную или дополнительную литературу и Интернет-ресурсы).
- Усвойте основные (базовые) термины и понятия по данной теме и изучив глоссарий.
- Ответьте на контрольные вопросы для самопроверки по данной теме для повторения и закрепления изученного.
- выполните задание для самостоятельной работы по теме.
- Выполните тест по теме или рубежный контроль после изучения раздела/модуля, а также итоговый в конце курса.
- Подготовьтесь к семинару – очному или электронному (форум, чат).

Методические указания для преподавателя

Аннотация

Курс предназначен для системы дистанционной формы обучения, а также в качестве дополнительного учебного материала для студентов очных отделений.

Дистанционный учебный курс «СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ НАНОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МАШИНОСТРОЕНИИ» представляет собой *Электронный учебно-методический комплекс*, включающий в себя Электронный теоретический курс (веб-учебник) и дополнительные электронные учебные материалы различного назначения – словари, иллюстративный материал, лабораторный практикум и др. справочная информация, в т.ч. и Интернет-ресурсы, а также соответствующее программное обеспечение и инструментальные средства коммуникации.

Целевая аудитория и её особенности

Предлагаемый дистанционный курс предназначен в первую очередь для магистров очного и заочного отделений машиностроительных ВУЗов, обучающихся по специальности «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты» как для самостоятельного изучения предмета, так и при интерактивной поддержке со стороны преподавателя на основе использования средств Интернет-технологий. Кроме того, к потенциальной аудитории могут быть отнесены следующие социальные группы: лица, желающие получить второе образование; лица, не имеющие возможность получить традиционное образование из-за трудности совмещения учебы с работой; офицеры и сержанты, служащие в рядах РА; лица, проживающие в малоосвоенных регионах, удаленных от вузовских центров; русскоязычное население в зарубежных странах; лица с ограниченной свободой перемещения, нуждающиеся в обучении на дому (инвалиды).

Цели и задачи курса

Продолжительность обучения на данном курсе составит один семестр (72 часа).

Базовыми для курса «Современные методы проектирования нанотехно-логических процессов в машиностроении» являются следующие: «Технология машиностроения», «Теория резания», «Режущие инструменты», «Металлорежущие станки», «Основы триботехники и смазки».

Целью курса является изучение студентами основ системного подхода к решению актуальных задач повышения долговечности деталей и узлов машин на базе современных методов и средств обработки металлов;

Основные задачи курса:

- дать представление о технологических возможностях и области эффективного применения упрочняющих методов, повышающих требуемые эксплуатационные свойства деталей;
- дать основы знаний об основных методах упрочнения поверхностей различных типов деталей для достижения требуемого качества изделия;
- дать основы знаний о причинах отклонений формы и размеров обработанных деталей от требуемых в нанометрическом диапазоне;
- дать умение моделировать и исследовать на компьютерах модели отклонений формы и размеров.

ЛЕКЦИЯ 1. Общие сведения о состоянии поверхности деталей, обработанных особо точными методами с упрочняющей технологией. Особенности упрочняющих технологий в системе достижения высокой износостойкости и поверхностной прочности

ЛЕКЦИЯ 2. Нанотехнологические процессы как одно из основных перспективных направлений современного машиностроения. Основные виды процессов упрочняющей нанотехнологии

ВЫБОР ВАРИАНТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

ЛЕКЦИЯ3. Физические основы деформационного упрочнения металлов. Сущность, особенности и состояние поверхностного слоя детали. Параметры состояния поверхностного слоя деталей машин

ЛЕКЦИЯ4. Физические основы разрушения металлов. Понятие дислокации. Классификация узлов трения. Виды изнашивания

СТРУКТУРНЫЕ НЕСОВЕРШЕНСТВА В РЕАЛЬНЫХ КРИСТАЛЛАХ

ОБРАЗОВАНИЕ И РАЗМНОЖЕНИЕ ДИСЛОКАЦИЙ

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

КЛАССИФИКАЦИЯ УЗЛОВ ТРЕНИЯ

ЛЕКЦИЯ 5. Постановка задачи обеспечения качества поверхностного слоя. Классификация методов отделочно-упрочняющей обработки деталей машин

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

Виды и назначение технологических методов поверхностного упрочнения деталей

УПРОЧНЕНИЕ С ОБРАЗОВАНИЕМ ПЛЕНКИ НА ПОВЕРХНОСТИ

УПРОЧНЕНИЕ С ИЗМЕНЕНИЕМ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ МЕТАЛЛА

УПРОЧНЕНИЕ С ИЗМЕНЕНИЕМ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

УПРОЧНЕНИЕ С ИЗМЕНЕНИЕМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЗАПАСА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

УПРОЧНЕНИЕ С ИЗМЕНЕНИЕМ МИКРОГЕОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТИ И НАКЛЕПОМ

УПРОЧНЕНИЕ С ИЗМЕНЕНИЕМ СТРУКТУРЫ ВСЕГО ОБЪЕМА МЕТАЛЛА

ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ

ГАЛЬВАНИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

ЛЕКЦИЯ 6. Основные методы поверхностного пластического деформирования (ППД)

КЛАССИФИКАЦИЯ И ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ ППД

ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ПОВЕРХНОСТНО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ (ППД)

ФОРМИРОВАНИЕ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ОБКАТЫВАНИИ РОЛИКОМ

ЛЕКЦИЯ 7. Численная модель ППД. Основы теории упрочняемого жесткопластического тела

Силы, возникающие при алмазном выглаживании

Трение и смазка

Инструменты для выглаживания

[Вибровыглаживание](#)

ЛЕКЦИЯ 8. Глубина деформационного упрочнения поверхностного слоя

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ В ТОЧКЕ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ

РАСЧЕТ ГЛУБИНЫ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА

Расчет приближенного значения накопленной деформации поверхностного слоя

Определение подачи S/z

Определение диаметра ролика

Определение силы обкатывания

СУЩНОСТЬ УПРОЧНЕНИЯ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

ЛЕКЦИЯ 9. Методы лазерного, электронно-лучевого, плазменного и детонационного упрочнения деталей машин

Лазерное упрочнение - термическое действие лазерного излучения. Может быть применено для поверхностной термообработки (закалка и "залечивание" микродефектов оплавлением) быстроизнашивающихся металлических деталей, например режущего инструмента.

Лазерная наплавка

Электронно-лучевая обработка

Методы детонационного и плазменного нанесения покрытий

Плазменное поверхностное упрочнение деталей

ЛЕКЦИЯ 10. Характеристики рабочих поверхностей деталей, обеспечивающие точность в нанометрическом диапазоне

ЛЕКЦИЯ 11. Факторы, препятствующие достижению высокоточных поверхностей: вибрации упругих систем станков и режущих инструментов

ЛЕКЦИЯ 12. Дисбаланс вращающихся деталей станков. Дисбаланс обрабатываемых изделий

ЛЕКЦИЯ 13. Колебания из-за неточности изготовления и сборки узлов, колебания фундаментов

ЛЕКЦИЯ 14. Моделирование и теоретический анализ относительных колебаний инструмента и заготовки

ЛЕКЦИЯ 15. Пассивная и активная балансировка вращающихся деталей

АКТИВНЫЕ МЕТОДЫ БАЛАНСИРОВКИ РОТОРОВ (АБУ)

ЛЕКЦИЯ 16. Методика особо точных измерений абсолютных и относительных колебаний: световолоконного, лазерного, вихретокового

СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЙ ВЕЛИЧИНЫ И ФАЗОВОГО УГЛА ДИСБАЛАНСА В НАНОМЕТРИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ

ЛЕКЦИЯ 17. Датчики и измерительная аппаратура для нанометрического диапазона

ЛЕКЦИЯ 18. Компьютерные устройства и программы регистрации относительных колебаний режущего инструмента и обрабатываемой поверхности

КОМПЬЮТЕРИЗИРОВАННАЯ БАЛАНСИРОВКА СИСТЕМЫ «ШПИНДЕЛЬ-ЗАГОТОВКА»

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ГАШЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ ШПИНДЕЛЕЙ ОСОБО ТОЧНЫХ ТОКАРНЫХ СТАНКОВ

ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ КУРСА

1.1.Название курса: «СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ НАНОТЕХНО-ЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МАШИНОСТРОЕНИИ»

Цели и задачи курса:

Область знаний – машиностроение.

Уровень обучения – магистратура.

Курс является обязательным для специальности «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты».

Основная цель курса – сформировать у студента:

- системный подход к решению актуальных задач повышения долговечности деталей и узлов машин на базе современных методов и средств поверхностной обработки металлов;
- представление о технологических возможностях и области эффективного применения упрочняющих методов, повышающих требуемые эксплуатационные свойства деталей;
- основы знаний об основных методах упрочнения поверхностей различных типов деталей для достижения требуемого качества изделия;
- основы знаний о причинах отклонений формы и размеров обработанных деталей от требуемых в нанометрическом диапазоне;
- умение моделировать и исследовать на компьютерах модели отклонений формы и размеров.
-

Курс включает теоретические разделы и лабораторный практикум.

-

Инновационность курса:

1. Инновационность по содержанию обеспечивается использованием в лекционных материалах монографий и докладов научных конференций последних лет, а также фонда патентной библиотеки.

2. Инновационность по методике преподавания основана на комплексном подходе к учебному процессу за счет создания УМК, и объединения в одном курсе лекционной части, лабораторного практикума и компьютерного моделирования.

3. Инновационность по литературе является проблемной в связи с ограниченностью изданий технической литературы, с резко ограниченным пополнением фонда научной библиотеки РУДН и закрытостью большинства работ по рассматриваемой тематике.

4. Инновационность организации учебного процесса предстоит отработать по ходу выполнения программы и целевого финансирования.

Структура курса

Темы лекций

ЛЕКЦИЯ 1. Общие сведения о состоянии поверхности деталей, обработанных особо точными методами с упрочняющей технологией. Особенности упрочняющих технологий в системе достижения высокой износостойкости и поверхностной прочности - 2/2.

ЛЕКЦИЯ 2. Основные виды процессов упрочняющей нанотехнологии. Нанотехнологические процессы как одно из основных перспективных направлений современного машиностроения – 2/2.

ЛЕКЦИЯ 3. Физические основы деформационного упрочнения металлов. Сущность, особенности и состояние поверхностного слоя детали. Параметры состояния поверхностного слоя деталей машин – 2/2.

ЛЕКЦИЯ 4. Физические основы разрушения металлов. Понятие дислокации. Классификация узлов трения. Виды изнашивания – 2/2.

ЛЕКЦИЯ 5. Постановка задачи обеспечения качества поверхностного слоя. Классификация методов отделочно-упрочняющей обработки деталей машин – 2/2.

ЛЕКЦИЯ 6. Основные методы поверхностного пластического деформирования (ППД) – 2/2.

ЛЕКЦИЯ 7. Численная модель ППД. Основы теории упрочняемого жесткопластического тела – 2/2.

ЛЕКЦИЯ 8. Глубина деформационного упрочнения поверхностного слоя – 2/2.

ЛЕКЦИЯ 9. Методы лазерного, электронно-лучевого, плазменного и детонационного упрочнения деталей машин – 2/2

ЛЕКЦИЯ 10. Характеристики рабочих поверхностей деталей, обеспечивающие точность в нанометрическом диапазоне – 2/2.

ЛЕКЦИЯ 11. Факторы, препятствующие достижению высокоточных поверхностей: вибрации упругих систем станков и режущих инструментов – 2/2.

ЛЕКЦИЯ 12. Дисбаланс вращающихся деталей станков. Дисбаланс обрабатываемых изделий – 2/2.

ЛЕКЦИЯ 13. Колебания из-за неточности изготовления и сборки узлов, колебания фундаментов – 2/2.

ЛЕКЦИЯ 14. Моделирование и теоретический анализ относительных колебаний инструмента и заготовки – 2/2.

ЛЕКЦИЯ 15. Пассивная и активная балансировка вращающихся деталей – 2/2.

ЛЕКЦИЯ 16. Методика особо точных измерений абсолютных и относительных колебаний: световолоконного, лазерного, вихретокового – 2/2.

ЛЕКЦИЯ 17. Датчики и измерительная аппаратура для нанометрического диапазона – 2/2.

ЛЕКЦИЯ 18. Компьютерные устройства и программы регистрации относительных колебаний режущего инструмента и обрабатываемой поверхности – 2/2

Темы рефератов.

1. Основные методы поверхностного пластического деформирования (ППД).
2. Методы лазерного, электронно-лучевого, плазменного и детонационного упрочнения деталей машин.

3. Характеристики рабочих поверхностей деталей, обеспечивающие точность в нанометрическом диапазоне.
4. Факторы, препятствующие достижению высокоточных поверхностей.
5. Вибрации упругих систем станков и режущих инструментов.
6. Дисбаланс вращающихся деталей станков.
7. Дисбаланс обрабатываемых изделий.
8. Колебания из-за неточности изготовления и сборки узлов.
9. Колебания фундаментов.
10. Моделирование и теоретический анализ относительных колебаний инструмента и заготовки.
11. Пассивная и активная балансировка вращающихся деталей.
12. Методика измерений абсолютных и относительных колебаний.
13. Датчики и измерительная аппаратура для нанометрического диапазона.
14. Компьютерные устройства и программы регистрации относительных колебаний режущего инструмента и обрабатываемой поверхности .

Описание балльно-рейтинговой системы.

Общие правила выполнения контрольных заданий.

В соответствии с типовым положением о рубежной аттестации преподаватель сам вправе выбирать форму контроля, однако студенты должны быть заранее ознакомлены с правилами аттестации.

Правила выполнения контрольных заданий предусматривают контроль за изучением студентом очередных тем и степень усвоения пройденного материала. В качестве контрольных заданий используются контрольные вопросы, рефераты, задания.

Примерные типы письменных работ и форм устного контроля.

Последние 10 мин. каждой лекции могут отводиться для письменного тестирования уровня освоения материала. Оценки по тестам по пятибалльной системе служат для контроля текущей успеваемости и учитываются при сдаче экзамена. Возможна автоматическая простановка экзаменационной оценки при 100%-ном посещении и высокого среднего балла тестирования.

В конце лабораторной работы осуществляется просмотр записей в лабораторных тетрадях.

Шкала оценок, итоговые оценки (методика выставления).

В соответствии с типовым положением о балльно-рейтинговой системе контроля успеваемости студентов, рассмотренным на заседании Учебно-методической комиссии Ученого Совета РУДН применяется следующая система набора баллов:

Баллы за семестр	Автоматическая оценка	Баллы за экзамен	Общая сумма баллов	Итоговая оценка
91 - 100	5	-	100	5
76 - 90	4	0 - 20	76 – 90 91 – 110	4 5
55 - 75	3	0 - 20	56 – 75 76 – 90 91 – 74	3 4 5
35 – 54	-	0 - 20	55 – 74	3
< 35	-	-	< 35	2

По результатам работы в семестре студент может получить автоматическую оценку 5, 4 или 3 и может экзамен не сдавать. Если оценка его не удовлетворяет (4 или 3), он может сдать экзамен и, возможно, повысить свою оценку.

Студент, не получивший автоматической оценки, обязан сдавать экзамен. Но если он не забрал минимального числа баллов в течение семестра (35), то он не получает зачет и не допускается к экзамену.

Основные правила:

- максимальное число баллов в течение семестра – 100

- максимальное число баллов за экзамен – 20
- минимальное число баллов за семестр – 35
- необязательная сдача экзамена для студентов, имеющих в течение семестра автоматические оценки: 5, 4, 3.

Учебное время студента состоит из аудиторной нагрузки и внеаудиторной работы.

Аудиторная нагрузка составляет примерно 50% от общего объема учебного времени (лекции, семинары, групповые академические консультации и др.)

Внеаудиторная нагрузка включает два элемента:

А. Время, отводимое на самостоятельную работу студента для освоения курса:

- Время, необходимое на чтение литературы, рекомендованной по курсу и составление конспектов;
- Время, необходимое на подготовку письменных работ и устных выступлений;
- Время, необходимое на подготовку к промежуточным контрольным работам и иным видам промежуточной и итоговой аттестации. Аттестация - это вид письменного контроля знаний студентов по пройденному в семестре учебному материалу.

Б. Время, отводимое учебным планом на прохождение практик, написание курсовых и дипломных работ, подготовки к госэкзамену и т.д.

Правила подсчета баллов.

Исходя из общей суммы 100 баллов за работу в семестре, устанавливается:

Посещаемость - 20 баллов.

Активная работа на занятиях и творческая работа – 20 баллов.

Тестовое задание по 1-му разделу – 20 баллов.

Тестовое задание по 2-му разделу – 20 баллов.

Итоговое тестирование – 20 баллов.

Перечень вопросов итоговой аттестации.

Что такое «нанотехнология»?

Что такое «наноматериалы»?

Что такое «наносистемная техника»?

Чем определяется выбор технологического процесса изготовления детали?

Какими параметрами характеризуется качество поверхностного слоя деталей машин?

Что такое конструкционная прочность?

Какими технологическими методами возможно обеспечение оптимального качества поверхностного слоя?

Чем определяется долговечность детали?

Какими параметрами характеризуется геометрия поверхностного слоя?

Как сравнивают несущую способность шероховатости поверхностей, обработанных различными методами?

Причина возникновения остаточных макронапряжений и микронапряжений?

Каковы основные зоны поверхностного слоя?

Какие дефекты кристаллов вам известны?

Что такое плотность дислокаций?

Каким образом происходит разрушение металлов и сплавов?

Каковы основные виды изнашивания?

Какими методами можно повысить сопротивление усталости?
Какие методы отделочно-упрочняющей обработки вам известны?
Классификация методов обработки поверхности по технологическому признаку?
Классификация методов ППД.
В чем различие статических и ударных методов ППД?
Какие схемы ППД вам известны?
В чем преимущество накатывания перед выглаживанием?
Как изменяются свойства деталей при ППД?
В чем причина упрочнения металлов при пластическом деформировании?
Основные параметры процесса ППД?
Чем определяется микрорельеф поверхности после алмазного выглаживания?
Инструменты для выглаживания и схемы их установки?
Чем определяется глубина упрочнения?
Как определяется величина накопленной деформации поверхностного слоя?
От каких параметров зависит сила обкатывания?
Какие методы упрочнения поверхностей концентрированными потоками энергии вам известны?
Что является основой процесса лазерного упрочнения и наплавки?
В чем особенности электронно-лучевой обработки?
На чем основаны газотермические методы поверхностной обработки?
Какие схемы плазматронов вы знаете?
В чем особенности процесса резания структурно-неоднородных материалов?
Какие физические явления сопутствуют процессу трения?
Как масштаб рассмотрения отражается на исследовании трения?
В чем проявляется связь макроскопической и микроскопической силы трения?
Что является причиной возникновения автоколебаний в системе СИД?
В чем проявляется координатная связь в упругой системе?
В чем особенности главных осей жесткости?
В чем основное преимущество аэростатических опор шпинделей?
Что такое «центр жесткости» шпиндельного узла?
Как изменяются характеристики системы после установки заготовки на шпиндель?
Какие недостатки шпинделей на аэростатических опорах?
С помощью каких приемов уменьшается влияние внешних воздействий при обработке на ОТТС?
Чем определяется шероховатость поверхности при алмазном точении?
Какие факторы влияют на волнистость торцовой поверхности при обработке на ОТТС?
При какой балансировке шпинделя с заготовкой получают наименьшие отклонения от плоскостности?
Какими способами снижают влияние колебаний, передающихся через фундамент?
Как описывается поведение системы с одной степенью свободы в случае вынужденных колебаний?
Что такое коэффициент динамичности?
Какие элементы входят в систему гашения колебаний?
Какие методы используются в автоматических балансировочных устройствах?
Какие требования предъявляются к автоматическим балансировочным устройствам?
Как определяется радиальная и угловая жесткость шпиндельного узла?
Как определяется АЧХ шпинделя?
Как устроен световолоконный датчик малых относительных перемещений?
Как устроены высокочувствительные виброметры?
Как определяется микроструктура поверхности твердых тел?

Принцип действия сканирующего туннельного микроскопа?
Назовите основные узлы сканирующего туннельного микроскопа.
Как действует атомно-силовой микроскоп?

1 Задания для самостоятельной работы по темам.

1.1 Лекция 1.

На какие эксплуатационные свойства оказывает влияние качество поверхностного слоя деталей машин?

О чем свидетельствует связь характеристик качества поверхностного слоя с эксплуатационными свойствами деталей?

Что может являться концентратором напряжений?

Какие характеристики материала характеризуют его способность противостоять хрупкому разрушению?

В чем особенности усталостных разрушений?

1.2 Лекция 2

В чем причины появления новых уникальных свойств у наноматериалов?

На какие группы могут быть разделены нанотехнологии?

Каковы области применения высокоскоростного резания?

Каковы области применения электроэрозионной обработки?

Каковы области применения лазерного спекания или плавления?

1.3 Лекция 3

Какие дефекты поверхности детали, не регламентированные ГОСТом Вам известны?

Охарактеризуйте понятие «поверхностный слой» в сравнении с основной массой детали и его служебными свойствами.

Поверхности с масляными карманами (искусственными), область применения?

Охарактеризуйте контакт реальных поверхностей деталей машин.

Как структура и фазовый состав влияют на состояние поверхностного слоя?

1.4 Лекция 4

Каким образом пластическая деформация и термообработка приводят к увеличению плотности дислокаций?

Что является причиной возникновения микротрещин?

Из-за чего возникают структурные несовершенства?

По каким признакам классифицируют узлы трения?

Явления, происходящие в поверхностном слое при обработке ППД, механизм упрочнения.

1.5 Лекция 5

Какими технологическими методами можно повысить запасы прочности деталей, работающих при переменных нагрузках?

Как можно повысить прочность и долговечность деталей и конструкций?

Чем определяется контактная выносливость?

На чем основаны классификации методов упрочнения деталей?

1.6 Лекция 6

Преимущества методов ППД по сравнению с другими методами.

Сущность ППД?

Сравнительный анализ и области рационального применения различных методов ППД.

Каковы особенности статических и ударных методов ППД?

В чем взаимосвязь степени деформации поверхностного слоя и размерами продольной волны при обкатывании?

1.7 Лекция 7

Как связаны изменения поверхностного слоя при ППД и искажения кристаллической решетки?

В чем отличительные свойства выглаживания?

В чем преимущества алмазных выглаживателей?

Как происходит деформация поверхности в направлении скорости выглаживателя и в направлении подачи?

1.8 Лекция 8

Что понимается под напряженным состоянием?

Как определить границу раздела упрочненного и основного материала?

Как определяется поле напряжений?

Как происходит процесс упрочнения поликристаллических тел?

1.9 Лекция 9

Отличительные особенности упрочнения поверхностей концентрированными потоками энергии?

На чем основана классификация методов упрочнения поверхностей концентрированными потоками энергии?

Какие разновидности лазерной обработки поверхностей применяются?

Отличительные особенности детонационного метода нанесения покрытий.

Отличительные особенности плазменного метода нанесения покрытий.

1.10 Лекция 10

Опишите условия для реализации сухого трения.

В чем сущность эффекта «прилипания-скольжения»?

Чем объясняется различная зависимость силы трения от влажности для гидрофильных и гидрофобных поверхностей?

В чем проявляется неконсервативность силы трения в нанотрибологии?
Чем отличаются зависимости силы трения в макро- и микротрибологии?

1.11 Лекция 11

Опишите механизм влияния колебаний на процесс обработки резанием.

Почему «падающая» зависимость силы трения от скорости не является универсальным механизмом возникновения автоколебаний?

Каков механизм влияния параметров процесса резания на амплитуду колебаний?

Как происходит перераспределение энергии при колебаниях?

В чем проявляется зависимость механизма стружкообразования на автоколебания?

1.12 Лекция 12

Почему можно при моделировании пренебречь осевым смещением шпинделя ОТТС?

По какой причине дисбаланс системы шпиндель-заготовка можно представить в виде одной неуравновешенной массы?

Каким образом проявляется действие диссипативных сил на амплитуду автоколебательного процесса?

В каких случаях оправдано пренебрежение касательными силами инерции?

В каких случаях поведение шпинделя не имеет резонансный характер?

1.13 Лекция 13

В чем причина выхода обработанной поверхности из поля допуска после первоначальной балансировки шпинделя с заготовкой?

В результате чего возникает переменный во времени момент центробежной силы при торцовом точении?

В каком случае можно пренебречь демпфированием в аэростатических опорах шпинделя?

В каком случае необходимо выполнять несколько проходов шпинделя для получения необходимой формы детали?

1.14 Лекция 14

Проанализируйте изменение величин, составляющих длину контакта по задней грани за один период колебаний инструмента.

Каким образом соотношение частот k и ω влияет на установление стационарного колебательного процесса?

В чем назначение элементов системы активного гашения колебаний?

Как влияет угол фазового сдвига на амплитуду вынужденных колебаний?

1.15 Лекция 15

Какие элементы необходимы для реализации системы определения АЧХ шпинделя?

В чем суть метода определения АЧХ шпинделя?

Какие величины необходимы для построения АЧХ шпинделя?

Сравните методы случайного и направленного поиска необходимых положений корректирующих масс?

1.16 Лекция 16

Опишите назначение элементов стенда для исследования динамических характеристик шпинделя.

Чем объясняется малая связанность радиальных и угловых колебаний шпинделя?

В чем заключаются трудности измерения абсолютных и относительных колебаний при вращении шпинделя ОТТС?

От чего зависит чувствительность световолоконного датчика?

1.17 Лекция 17

В каких режимах может работать сканирующий туннельный микроскоп?

В каких средах и при каких условиях может работать сканирующий туннельный микроскоп?

Каковы преимущества и недостатки сканирующего туннельного микроскопа?

Какие методики используются в атомно-силовой микроскопии?

Лекция 18

Разберите по векторной диаграмме процедуру балансировки по методу 3-х пусков.

В чем преимущества балансировки по методу 3-х пусков?

Каким образом можно повысить точность установки балансировочных грузов?

Как работает устройство измерения и гашения колебаний?

Сведения об авторах



Рогов Владимир Александрович

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой технологии машиностроения, металлорежущих станков и инструментов инженерного факультета Российского университета дружбы народов.

Почетный работник высшего профессионального образования РФ.

Год рождения – 1956.

После окончания Рыбинского авиационного техникума трудовую деятельность начал на Рыбинском моторостроительном заводе, где работал шлифовщиком и слесарем-инструментальщиком. После службы в рядах Советской Армии он в 1977 году поступил учиться на инженерный факультет РУДН по специальности «Производство и эксплуатация машин», который закончил в 1983 году. По окончании университета был принят в аспирантуру, занимался научными исследованиями и в 1986 году защитил кандидатскую диссертацию.

Рогов В.А. является автором нового научного направления по исследованию возможности использования композиционных материалов при изготовлении корпусов инструментов. В этой области им получено 168 авторских свидетельств СССР и патентов РФ. В 1998 году Рогов В.А. успешно защитил докторскую диссертацию на тему: «Разработка комбинированных корпусов режущих инструментов из синтегранна с повышенными демпфирующими свойствами» и в 1999 году ему присуждена ученая степень доктора технических наук, а в 2000 году – ученое звание профессора. С 1997 года – и.о. зав. кафедрой, а с 1999 г. – по настоящее время - заведующий кафедрой «Технологии машиностроения, металлорежущие станки и инструменты».

Рогов В.А. является председателем докторского совета Д212.203.16, в котором защитили диссертационные работы более 100 человек.

Является автором более 320 научных и учебно-методических работ, в том числе 5 учебников, опубликованных с грифом Минвуза, под его руководством защитили диссертации 10 аспирантов.



Копылов Владимир Викторович

к.т.н., доцент кафедры технологии машиностроения, металлорежущих станков и инструментов инженерного факультета Российского университета дружбы народов.

Год рождения – 1955.

Место рождения – г. Жданов Донецкой области.

В 1978 г. окончил Московское Высшее Техническое Училище им. Н.Э. Баумана, факультет Автоматизации и механизации производства по специальности Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты.

С 1981 года работаю в РУДН, прошел путь старшего лаборанта, аспиранта, научного сотрудника, заведующего лабораторией, преподаю с 2002 года.

В 2002 году защитил кандидатскую диссертацию на тему: «Разработка и исследование экспериментально-аналитической модели взаимосвязи стойкости сборных проходных резцов с параметрами их колебаний в процессе резания». Являюсь автором 15 изобретений и более 30 научных работ. Основная направленность – исследование процесса резания, режущие инструменты, техника эксперимента.

Веду дисциплины: «Режущие инструменты», «Гидропневмоавтоматика технологического оборудования», «Методика и практика технических экспериментов», «Математическое и физическое моделирование» и ряд других.

Женат, сын – студент МАРХИ.

Электронный почтовый адрес: vvkopylov@mail.ru.



Позняк Георгий Григорьевич

д.т.н., профессор кафедры технологии машиностроения, металлорежущих станков и инструментов инженерного факультета Российского университета дружбы народов.

Год рождения - 1937 г.

В 1959 г. закончил Московский Станкоинструментальный институт (СТАНКИН). Работал на заводе, в проектно-институте. В 1962 – 1965 г.г. учился в аспирантуре СТАНКИНа, с 1965 по 2008 г.г. работал в Университете дружбы народов на кафедре Технологии металлорежущих станков и инструментов ассистентом, доцентом и профессором. Является автором 168-ми публикаций, в том числе 17-ти учебных и методических пособий и 46-ти изобретений, под его руководством успешно защитились 14 отечественных и иностранных аспирантов.