

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

КУЙБЫШЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ имени С. П. КОРОЛЕВА

А. С. БЕЛЯЕВ

ПОВЕРХНОСТНОЕ
УПРОЧНЕНИЕ
ДЕТАЛЕЙ
АВИАЦИОННЫХ
КОНСТРУКЦИЙ

Конспект лекций

В конспекте лекций рассматриваются физические основы упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием (ППД). Дается характеристика наиболее распространенных методов их упрочнения. Излагаются основы расчета технологических параметров и режимов обработки. Рассматривается влияние упрочнения на качественные характеристики поверхностного слоя и усталостную прочность деталей.

Конспект рассчитан на студентов самолетостроительного и моторостроительного факультетов, а также может быть полезен технологам авиационных заводов.

Темплан 1979, поз. 2147.

Под редакцией доцента Ф. И. Китаева

Рецензенты: Ю. Г. Голубев, Б. И. Крамаровский.

Утвержден редакционно-издательским советом института
16.12.77 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Повышение надежности и долговечности летательных аппаратов является важнейшей проблемой современного авиастроения.

Увеличение скоростей полета и ужесточение весовых характеристик летательных аппаратов обуславливают создание таких технологических процессов, которые наряду с конструктивными решениями смогли бы обеспечить необходимую надежность, ресурс и заданные эксплуатационные характеристики изделия.

В процессе эксплуатации машин в наиболее напряженных условиях находится тонкий поверхностный слой металла деталей, от качества и физико-механических характеристик которого в основном и зависит работоспособность изделия. Поэтому на передний план выдвигаются создание и изучение новых методов обработки, обеспечивающих прежде всего получение заданных качественных характеристик поверхностного слоя.

В настоящее время, как в нашей стране, так и за рубежом, для решения данной задачи широко применяется так называемая упрочняющая технология, включающая множество различных методов обработки пластическим деформированием поверхностных слоев металла без снятия стружки.

В процессе обработки поверхностным пластическим деформированием (ППД) [1] происходит как бы качественная перестройка тонкого поверхностного слоя металла детали, его упрочнение (наклеп) и формирование остаточных напряжений

сжатия. Величина этих напряжений зависит, главным образом, от метода ППД и может достичь предела текучести материала.

Совокупность указанных факторов и является главной причиной повышения эксплуатационных свойств деталей, обработанных ППД.

Данный конспект является кратким обобщением наиболее распространенных методов упрочняющей технологии, применяемых при изготовлении летательных аппаратов.

1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

Исследования напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя упрочненного материала позволили раскрыть сущность процессов и явлений, протекающих при упрочнении, и обосновать ту положительную роль, которую они играют в повышении эксплуатационных свойств деталей машин.

Основными характеристиками поверхностного слоя после упрочнения являются остаточные напряжения и наклеп.

Остаточные напряжения по классификации академика Давиденкова Н. П. можно разделить на три вида (рода).

Напряжения 1-го рода — это макронапряжения, распространяющиеся на объемы, соизмеримые с размерами детали, и имеющие ориентацию, связанную с ее геометрической формой. Эти напряжения могут быть рассчитаны методами сопротивления материалов и теории упругости на основе уравнений механики сплошных сред.

Напряжения 2-го рода — это микронапряжения, градиент которых существенно изменяется лишь в пределах объемов, соизмеримых с объемами кристаллических зерен.

Напряжения 3-го рода — это субмикроскопические напряжения, возникающие в результате нарушения межатомных связей в кристаллической решетке.

Напряжения 2-го и 3-го рода пока не могут быть рассчитаны теоретически и определяются экспериментальным путем, как правило, методами рентгеноструктурного анализа. Эти напряжения являются чисто структурными и по своей абсолютной величине могут быть существенными.

Наиболее изученными являются напряжения 1-го рода. Они возникают в поверхностных слоях деталей после различных методов обработки и, как считается, оказывают превалирующее влияние на изменение эксплуатационных характеристик деталей. После механической обработки лезвийным инструментом или абразивом в поверхностном слое формируются, как правило, остаточные растягивающие (положительные) напряжения, отрицательно влияющие на работоспособность деталей. В таких случаях обращаются к упрочняющей технологии. Одна из главных ее целей — обеспечить в поверхностном слое после окончательной обработки остаточные напряжения сжатия (отрицательные) и за счет этого свести до минимума неблагоприятную технологическую наследственность от предварительных операций (точение, шлифование, фрезерование и т. п.).

Многочисленные исследования показали, что формирование остаточных напряжений 1-го рода при любых методах обработки происходит в основном под действием силового и температурного полей, имеющих место в зоне контакта инструмента с деталью.

Под действием силового фактора в поверхностных слоях происходят неравномерные пластические деформации, которые обуславливают возникновение, главным образом, сжимающих остаточных напряжений [2]. Значительные пластические деформации вызывают упрочнение (наклеп) металла, сопровождающееся его объемным изменением.

По данным Окнова М. Г., увеличение удельного объема металла (снижение плотности) в результате наклепа может достигать 0,3—0,8%. Так, при холодной прокатке меди со степенью деформации 80% ее плотность уменьшается от 8,95 до 8,89 гс/см³. Уменьшение плотности металла при холодном пластическом деформировании объясняется массовым развитием дислокаций и вакансий, способствующих образованию микропор и микропустот в деформированном объеме металла. Действие силового поля проявляется также в изменении формы зерен, их сжатия по глубине и вытягивания вдоль поверхности. Таким образом, верхние пластически деформированные слои металла в результате увеличения объема и вытягивания зерен стремятся расшириться. Этому препятствуют нижележащие упруго деформированные слои. В результате такого взаимодействия в наружном наклепанном слое возникают напряжения сжатия, а в сердцевине — напряжения растяжения.

Причиной возникновения остаточных напряжений являются термопластические деформации и фазовые превращения. В первом случае остаточные напряжения являются следствием расширения верхних слоев металла при нагреве. После охлаждения в них формируются остаточные напряжения растяжения. В результате фазовых превращений (в зависимости от удельного веса образовавшейся фазы) происходит увеличение или уменьшение объема металла, что приводит к образованию остаточных напряжений или сжатия, или растяжения. Фазовые изменения в металле могут происходить не только под действием тепла, но и в результате больших пластических деформаций, вызванных воздействием силового фактора.

Рассмотренные причины образования остаточных напряжений являются общими практически для любых методов обработки металлов. Уровень и знак напряжений зависит от вида обработки, ее режимов и марки обрабатываемого материала.

При упрочнении в результате значительных пластических деформаций происходит как бы перестройка поверхностного слоя детали. Независимо от уровня и знака остаточных напряжений, обусловленных предварительной обработкой, после ППД в поверхностном слое формируются напряжения сжатия и повышается его микротвердость. Одновременно изменяется и микрорельеф поверхности — образуется волнистый профиль со скругленными выступами и впадинами, исключаящими концентрацию напряжений.

Упрочнение металла при обработке поверхностным пластическим деформированием — это сложный физико-химический процесс. Согласно теории дислокаций, основной причиной упрочнения является лавиноподобное образование дислокаций — дефектов кристаллической решетки металла, скапливающихся вблизи линий сдвигов, и последующее их застревание перед различного рода препятствиями, образующимися в процессе деформации. Дробление на блоки объемов металла, заключенных между линиями скольжения, поворот этих блоков, искривление плоскостей скольжения, накопление на них продуктов разрушения кристаллической решетки, пересечение линий движения дислокаций, — все это способствует концентрации дислокаций по всему объему и уменьшению их подвижности. Указанное явление блокирует и затрудняет развитие сдвигов при пластической деформации, а следовательно, повышает степень упрочнения.

Большая номенклатура деталей летательных аппаратов, подвергающаяся упрочнению, определяет количество и разнообразие применяемых в настоящее время методов ППД (рис. 1) [1]. Применение в технологическом процессе того или иного метода упрочнения обусловлено его возможностями и конструктивными особенностями обрабатываемых деталей. Режимы упрочнения назначаются, исходя из условия получения необходимых качественных характеристик поверхностного слоя детали, а также с учетом спецификации ее работы в процессе эксплуатации.

Рассмотрим некоторые методы упрочняющей технологии, наиболее часто применяющиеся в авиадвигателестроении.

2.1. Обработка дробью

Сущность дробеударного упрочнения заключается в бомбардировке поверхности детали потоком дроби, обладающим значительным запасом кинетической энергии. Источником энергии дроби является струя газа, жидкости, центробежная сила или ускорение силы тяжести. В зависимости от типов и конструкций установок скорость вылета дроби может изменяться в пределах от 30 до 200 м/с.

Обработка дробью применяется для упрочнения разнообразных деталей планера и двигателей летательных аппаратов — лонжеронов, бимсов, деталей шасси, монорельсов, обшивок, панелей, лопаток турбины и компрессора, подшипников и т. д. Основным достоинством дробеударной обработки является возможность эффективного упрочнения деталей различной конфигурации, имеющих мелкие надрезы, напы и резьбовые поверхности.

Обработка дробью обеспечивает следующие количественные характеристики поверхностного слоя:

глубина наклепа — 1,0—1,5 мм;

степень наклепа — 20—50% (в зависимости от марки материала);

величина остаточных напряжений сжатия достигает предела текучести материала;

шероховатость поверхностного слоя по R_a — 0,2—1,5 мкм.

Методы обработки ППО

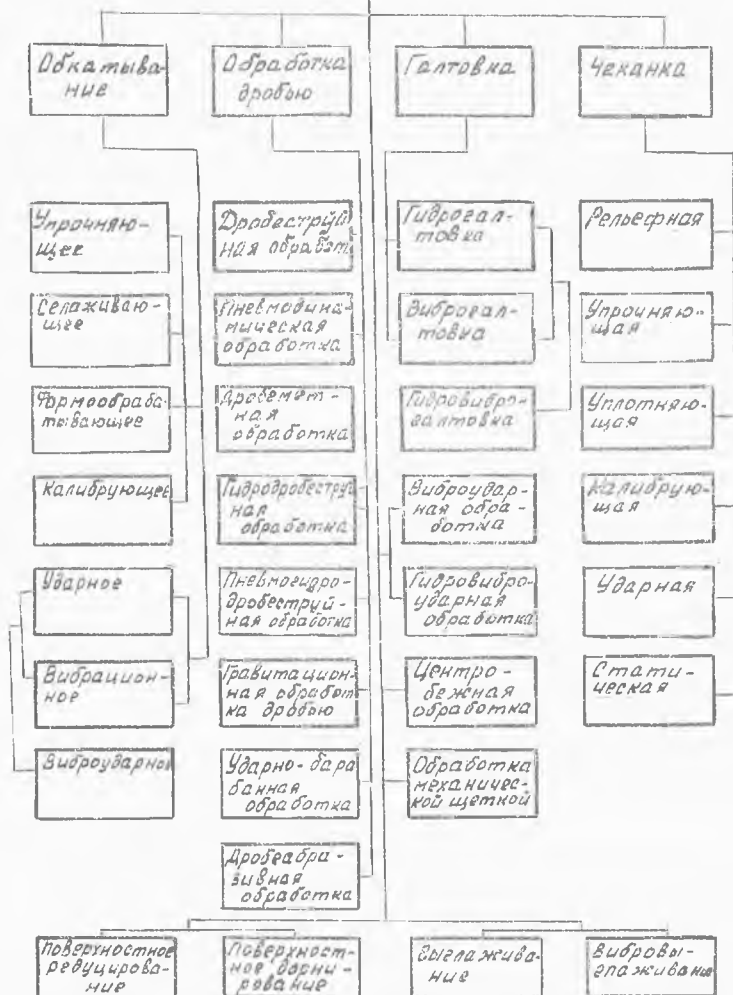


Рис. 1. Классификация методов обработки ППО

Усталостная прочность деталей после упрочнения дробью повышается на 15—50% в зависимости от марки материала и режимов упрочнения. Изменения размеров деталей после дробеударного упрочнения незначительны и исчисляются микронами. Поэтому точностные характеристики деталей определяются операциями, предшествующими упрочнению (шлифование, чистовое точение и т. д.).

2.1.1. Теоретические основы обработки дробью

Известно, что работа при статическом вдавливании дробинки в металл определяется приведенным в литературе [3] выражением:

$$A = \int_0^{\lambda} P d \lambda, \quad (1)$$

где P — сила вдавливания;
 λ — глубина отпечатка.

По данным П. П. Давиденкова, выражение для силы P имеет вид

$$P = \frac{\pi d^2}{4} H_0 \left(\frac{d}{D} \right)^{n-2}, \quad (2)$$

где d — диаметр отпечатка;
 D — диаметр дробины;
 n — коэффициент, характеризующий материал (для стали $n=2,2$);
 H_0 — статическая твердость материала.

Значение λ приблизительно можно определить по формуле

$$\lambda = \frac{d^2}{4D}. \quad (3)$$

После интегрирования выражение (1) принимает вид

$$A = \frac{\pi H_0 D^3}{8(n+2)} \left(\frac{d}{D} \right)^{n+2}. \quad (4)$$

Многочисленные исследования показали, что аналитические зависимости (1), (2), (3), (4), полученные из условия статической деформации, правомерны и для динамической. Однако постоянные коэффициенты n , H_0 имеют другие значения. Например, для стали в этом случае $n=2,0$. Тогда из вы-

ражения (2) можно найти значение твердости для стали в условиях динамического нагружения:

$$H_0 = H_{\text{дин}} = \frac{4P}{\pi d^2} \quad (5)$$

Динамическая твердость для каждого металла является величиной постоянной и может быть определена с помощью простых приборов (например, пружинного ударника Баумана).

Из уравнения (4) находим выражение для ударной энергии $A_{\text{дин}}$ ($n=2$):

$$A_{\text{дин}} = \frac{\pi}{32} \frac{H_{\text{дин}}}{D} d^4, \quad (6)$$

откуда диаметр отпечатка при ударном вмятии

$$d = 2 \sqrt[4]{\frac{2 A_{\text{дин}} D}{\pi H_{\text{дин}}}} \quad (7)$$

Глубина отпечатка

$$\lambda = \frac{d^2}{4D} = \sqrt{\frac{2 A_{\text{дин}}}{\pi H_{\text{дин}} D}} \quad (8)$$

Энергия удара дробинки определяется ее массой m , скоростью v и пропорциональна удельному весу γ и объему w дробинки:

$$A_{\text{дин}} = \frac{m v^2}{2} = \frac{\pi \gamma}{12g} D^3 v^2, \quad (9)$$

где g — ускорение силы тяжести.

С учетом уравнения (9), выражения (7) и (8) примут следующий вид:

$$d = 2D \sqrt[4]{\frac{\gamma}{6g} \frac{v^2}{H_{\text{дин}}}}; \quad (10)$$

$$\lambda = Dv \sqrt{\frac{\gamma}{6g} \frac{1}{H_{\text{дин}}}} \quad (11)$$

На основании опытов Варнелло В. В. можно принять, что зона наклепа будет геометрически подобна и прямо пропорциональна объему вмятины от дробинки. В этом случае глубина наклепа $\lambda_{\text{накл}}$ будет пропорциональна глубине вмятины:

$$\lambda_{\text{накл}} = k_1 \frac{Dv}{\sqrt{H_{\text{дин}}}}, \quad (12)$$

где k_1 — коэффициент пропорциональности, зависящий от удельного веса дробинки.

С учетом изменения угла встречи дроби с обрабатываемой поверхностью α (угол атаки) выражение (12) примет вид:

$$l_{\text{накл}} = k_1 \frac{D v \sin \alpha}{\sqrt{H_{\text{дин}}}} \quad (13)$$

По данным Саверина М. М. [3], в первом приближении можно считать, что глубина наклепанного слоя $\delta_{\text{накл}}$, создаваемая потоком дроби, будет пропорциональна глубине наклепа $\lambda_{\text{накл}}$, возникающего при ударе отдельной дробинкой, т. е.

$$\delta_{\text{накл}} = k_2 \frac{D v \sin \alpha}{\sqrt{H_{\text{дин}}}} \quad (14)$$

где k_2 — коэффициент пропорциональности.

Таким образом, глубина наклепа, являющаяся важнейшей характеристикой упрочнения поверхностного слоя, прямо пропорциональна скорости полета дроби, ее диаметру и обратно пропорциональна корню квадратному из динамической твердости металла.

Практика упрочнения показала, что степень наклепа и величина остаточных напряжений сжатия не возрастают беспрестанно, а по достижении определенной величины остаются на одном уровне, независимо от времени упрочнения. При этом наступает насыщение, и дальнейшее упрочнение становится неэффективным.

Исходя из условий оптимального наклепа, Саверин М. М. получил уравнение для определения времени, необходимого на обработку детали:

$$t = c_1 \frac{l D \sqrt{H_{\text{дин}}}}{v q \sin^2 \alpha} \quad (15)$$

где l — расстояние от сопла дробемета до обрабатываемой детали;

q — пропускная способность дробемета (по весу);

c_1 — коэффициент пропорциональности, величина которого для упрочнения круглой детали должна быть в 4 раза больше, чем плоской.

Величина расхода дроби определяется выражением

$$Q = c_2 \frac{l D \sqrt{H_{\text{дин}}}}{v \sin^2 \alpha} \quad (16)$$

Из уравнений (15) и (16) видно, что время и расход дроби, необходимые для упрочнения, увеличиваются с увеличе-

нием твердости материала детали, диаметра дроби, а уменьшаются с увеличением скорости дроби и угла атаки. Данные выражения применимы при расчете режимов обработки деталей, габариты которых не выходят за пределы потока дроби.

2.1.2. Технология обработки, оборудование

Технологический процесс упрочнения дробью обычно складывается из следующих основных этапов:

1. Подготовка оборудования к работе — проверка исправности установки, качества дроби.
2. Настройка дробеметной установки на заданный режим.
3. Упрочнение партии деталей.
4. Контроль качества упрочнения, который осуществляется по величине деформации образцов-свидетелей (пластины $100 \times 10 \times 1,0$), упрочняемых вместе с деталями.

Для дробеударной обработки применяются следующие виды дроби: чугунная, стальная, алюминиевая, стеклянная. Диаметр металлической дроби колеблется в пределах 0,1—12 мм, стеклянной — 0,013—0,5 мм. Основным преимуществом стеклянной дроби является отсутствие шаржирования упрочненной поверхности металлическими включениями. Однако глубина наклепа стеклянной дробью незначительная (не более 70 мкм), кроме того, эта дробь дороже металлической. Стеклянная дробь применяется, главным образом, для тонких отделочных операций по металлам невысокой твердости.

В настоящее время в производстве летательных аппаратов широкое применение находит стальная дробь. Несмотря на то, что она примерно в 5 раз дороже чугунной, ее расход в 30—60 раз меньше. Максимальная скорость дробеметания чугунной дроби ограничивается ее ударной прочностью и составляет 80—90 м/с. Применение стальной дроби позволяет повысить эту скорость в 2 раза. Современные установки обеспечивают скорость вылета снопа дроби до 200 м/с.

Алюминиевая дробь применяется для упрочнения деталей из цветных сплавов.

Одним из главных этапов проектирования технологических процессов дробеударной обработки является выбор диаметра дроби. При упрочнении деталей с концентраторами напряжений необходимо, чтобы диаметр дроби был меньше глубины и ширины концентратора. В противном случае будет упрочняться лишь верхняя его часть. С уменьшением диаметра

доби будет уменьшаться ее расход и время, необходимое на обработку.

Установлено также, что уменьшение диаметра дробы благоприятно сказывается на характере распределения остаточных напряжений сжатия в упрочненном слое. Данное заключение основывается на следующих рассуждениях.

Известно, что разрушение деталей в процессе эксплуатации происходит с поверхности. Ввиду этого благоприятным является такой вариант упрочнения, при котором наибольшие напряжения сжатия (подслойный максимум) и наибольший наклеп находятся ближе к поверхности детали. Согласно исследованиям Саверина М. М., при взятии дробины в металлы максимальные касательные напряжения и деформации возникают не на поверхности, а на глубине $(0,3-0,4) d/2$, где d — диаметр отпечатка. Таким образом, чтобы приблизить подслойный максимум остаточных напряжений к поверхности детали, необходимо уменьшать диаметр дробы (рис. 2). Однако, как видно из уравнения (14), с уменьшением диаметра дробы уменьшается глубина наклепаемого слоя. Решение задачи по отысканию оптимального диаметра дробы осуществляется, как правило, теоретико-экспериментальными методами, исходя из условий наибольшей усталостной прочности упрочненной детали.

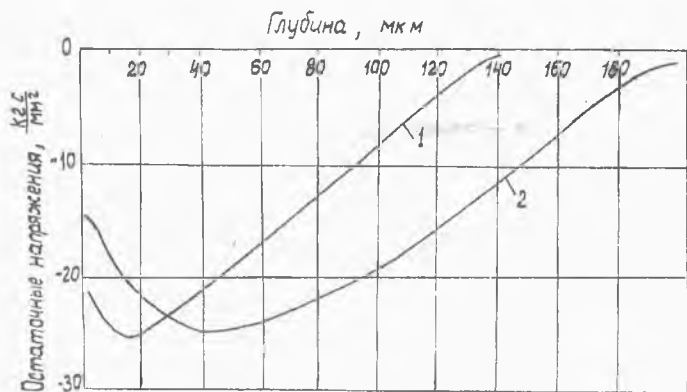


Рис. 2. Эпюры остаточных напряжений в плоских образцах из сплава Д16АТ после гидродробеструйной обработки стальными шариками: 1—диаметр шариков 0,7 мм; 2—диаметр шариков 2,1 мм

Рассмотрим конструкции некоторых установок, применяемых для упрочнения деталей планера и двигателей летательных аппаратов.

На рис. 3 показана схема дробемета конструкции ЦНИИТМАШ. Установка выполнена в виде автономного агрегата и обеспечивает непрерывную подачу дроби к ротору, очистку ее от пыли и осколков. Дробь загружается в бункер 1, откуда с помощью элеватора 3 подается в бункеры 2 и 4. Бункер 2 предназначен для размещения излишков дроби, не вмещающихся в бункер 4 при непрерывной работе элеватора.

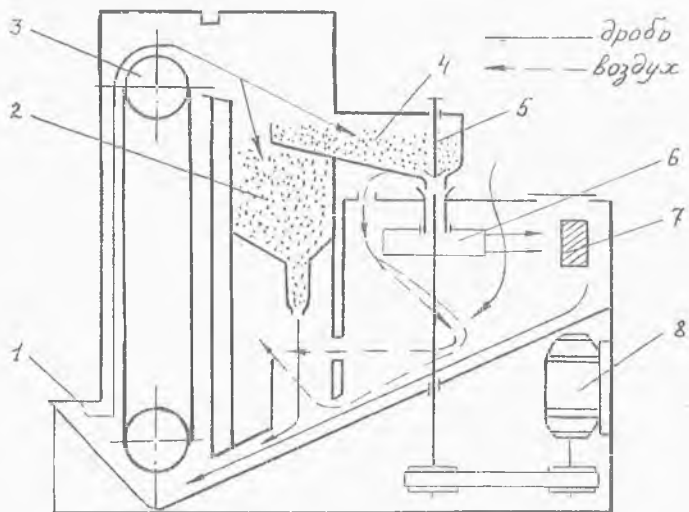


Рис. 3. Принципиальная схема универсальной дробеметной установки ДУ-1

При открытии питателя 5 поток дроби подается на ротор 6, вращающийся от электродвигателя 8 и в виде снопов выбрасывается через окна ротора на деталь 7. Деталь может быть неподвижной или иметь вращение. Отработанная дробь скатывается в загрузочный бункер 1, очищаясь по пути сжатым воздухом. Для подачи воздуха предусмотрены специальный вентилятор и сепаратор (на рис. 3 не показаны).

Диапазон чисел оборотов ротора — 600—3500 об/мин, диаметр ротора — 300 мм, максимальная скорость дроби — 70 м/с, максимальная производительность ротора — 130 кгс/мин.

Установка ДУ-1 рассчитана на работу с чугунной или стальной дробью диаметром 0,4—2,0 мм и применяется для упрочнения деталей средних габаритов из материалов невысокой твердости ($HB \leq 200$).

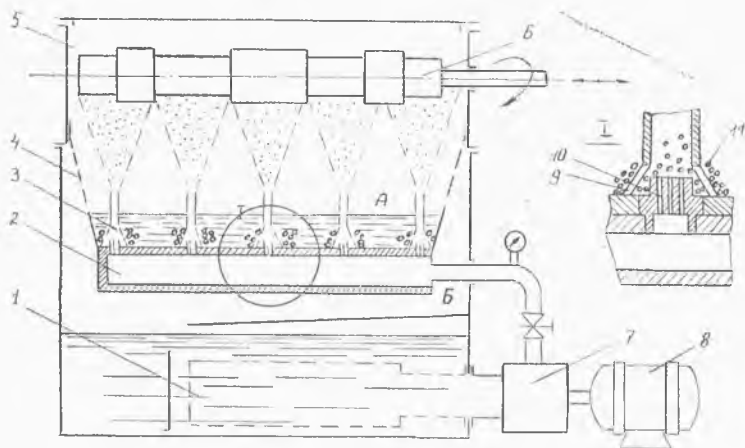


Рис. 4. Схема гидродробеструйной эжекторной установки: 1—фильтр; 2—коллектор; 3—сопла-эжекторы; 4—сетка; 5—рабочая камера; 6—деталь; 7—насос; 8—электродвигатель; 9—окно; 10—многоканальная форсунка; 11—дробь

На рис. 4 приведена схема многосопловой гидродробеструйной эжекторной установки (ГДЭУ) конструкции Петрова В. В. Упрочнение деталей производится стальными шариками диаметром 2—2,5 мм в среде трансформаторного масла. Установка состоит из рабочей камеры 5 с двумя полостями А и Б. Рабочая жидкость (масло) из полости Б нагнетается насосом 7 в общий коллектор 2, соединенный с соплами-эжекторами 3, имеющими многоканальные форсунки 10. Выбрасываясь через каналы форсунок под давлением 3 кгс/см², рабочая жидкость обеспечивает эжектирование дроби и жидкости, поступающих в зону форсунок из полости А через окна 9. Образовавшаяся при этом рабочая смесь (шарики-масло) производит бомбардировку вращающейся детали 6.

Производительность установки ГДЭУ при $P_{ж} = 3$ кгс/см² равна 700 кгс/мин, количество сопел-эжекторов — 24.

Конструкция установок, в которых источником кинетической энергии дроби является струя газа, принципиально не от-

личается от конструкций гидродробеструйных и механических дробемеров. Основной частью пневмодробеструйной установки, определяющей качество и эффективность упрочнения, является форсунка (рис. 5). Эжекция дробы диаметром 0,5—1,0 мм через рабочее сопло 1 диаметром 9 мм осуществляется за счет струи воздуха, поступающего по каналу 3 под давлением 5 кгс/см²; дробь поступает по каналу 2. Такая конструкция форсунки обеспечивает вылет дробы со скоростью 50—70 м/с. Существенным недостатком пневматических дробемеров является зависимость скорости дробы от давления воздуха, подаваемого, как правило, из общей (цеховой) сети.

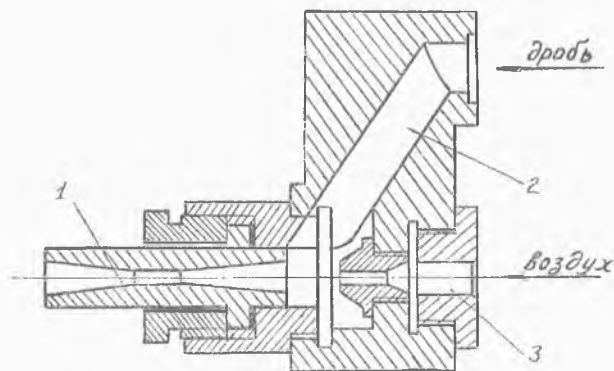


Рис. 5. Рабочая форсунка пневмодробеструйной установки конструкции НИАТ: 1 — рабочее сопло; 2 — канал подачи дробы; 3 — воздушный канал

Из всех процессов дробеструйной обработки, рассмотренных выше, наиболее эффективным является гидродробеструйное упрочнение.

Как установлено [4], при одинаковой кинематической энергии дробы глубина наклепанной зоны при наличии жидкости примерно на 12% больше, чем при сухом ударе. Кроме этого, присутствие жидкости способствует некоторому снижению шероховатости за счет сглаживания острых гребешков микро рельефа упрочняемой поверхности ударными гидравлическими волнами.

2.2. Алмазное выглаживание

Сравнительно новым методом ППД является алмазное выглаживание, позволяющее получить упрочненную поверхность с низкой шероховатостью и сжимающими остаточными напряжениями, проникающими на значительную глубину. Простота метода, а также возможность использования стандартного оборудования, позволяют применить выглаживание для деталей разнообразной номенклатуры и во многих случаях исключить из технологических процессов такие трудоемкие операции, как шлифование, полирование, хонингование, суперфиниширование.

Впервые выглаживание было предложено И. Холлом. Оно состоит в следующем (рис. 6): кристалл естественного алмаза весом 0,3—0,9 карат, закрепленный в наконечнике 3 и заправленный по сфере или цилиндру, прижимается с определенным усилием P_y к поверхности вращающейся детали 2 и перемещается в направлении подачи s . В месте контакта инструмента (выглаживателя) с деталью происходит локальный переход металла в состояние текучести, в результате чего образуется совершенно иной по своим свойствам поверхностный слой, характеризующийся низкой шероховатостью, наклепом и сжимающими остаточными напряжениями.

2.2.1. Методы алмазного выглаживания

Существует несколько методов алмазного выглаживания. Одним из наиболее распространенных является выглаживание с закреплением инструмента в упругих оправках. В этом случае радиальное усилие P_y , с которым осуществляется прижим выглаживателя к детали, задается с помощью пружины, протарированной в диапазоне от 5 до 40 кгс. Отсчет усилия P_y производится по индикатору 7 (рис. 6, а) или по шкале, нанесенной на корпусе оправки (рис. 6, б). Основным преимуществом такого метода является возможность выглаживания фасонных поверхностей, а также деталей эксцентричной формы без специальных приспособлений, что связано с плавным изменением усилия P_y при деформации пружины. К недостаткам метода следует отнести то, что исходные погрешности геометрической формы (волнистость, огранка и т. п.) не исправляются.

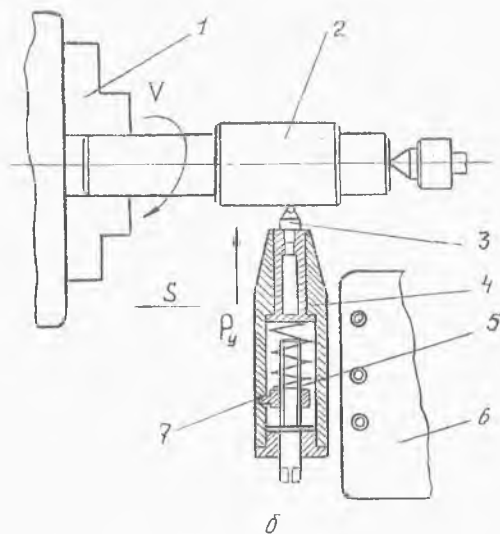
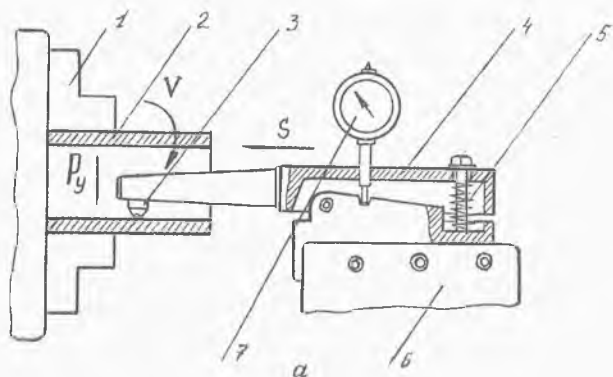


Рис. 6. Схема алмазного выглаживания с пружинным закреплением инструмента: а — внутренней поверхности; б — наружной поверхности; 1 — патрон станка; 2 — деталь; 3 — выглаживатель; 4 — оправка; 5 — пружина; б — резцедержатель; 7 — шкала (индикатор)

Известны конструкции оправок, в которых необходимое радиальное усилие P_y обеспечивается за счет упругой деформации самой оправки (рис. 7). Эта конструкция является более компактной, так как в ней отсутствуют пружина и сопутствующие ей детали. Однако для обработки фасонных поверхностей ее не применяют в связи с крутой деформационной характеристикой упругого элемента.

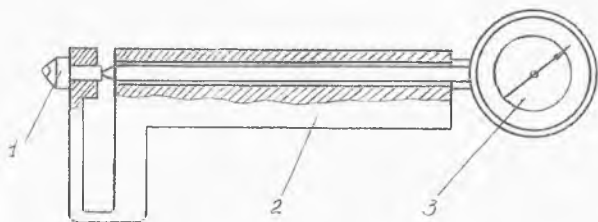


Рис. 7. Пружинящая оправка для алмазного выглаживания наружных цилиндрических поверхностей: 1 — выглаживатель; 2 — корпус оправки; 3 — индикатор

Второй метод алмазного выглаживания отличается тем, что инструмент взаимодействует с обрабатываемой поверхностью не упруго, а жестко. В этом случае силовой режим выглаживания задается величиной внедрения (натяга) выглаживателя в обрабатываемую поверхность. Оптимальная величина натяга составляет приблизительно $1,2 R_{\text{нех}}$, где $R_{\text{нех}}$ — высота неровностей исходной поверхности.

Отсчет величины P_y производится, как правило, по нониусу станка. При жестком закреплении инструмента наряду с уменьшением шероховатости возможно улучшение геометрической формы детали и уменьшение волнистости.

Метод жесткого выглаживания имеет ограниченное применение ввиду необходимости тарировки нониуса суппорта в единицах натяга. Кроме того, требуется более тщательное центрирование деталей.

Третий метод алмазного выглаживания — вибровыглаживание — существенно отличается от двух предыдущих (рис. 8). Алмазному выглаживателю 3 с помощью специального устройства 4 дополнительно в направлении подачи сообщаются осциллирующие движения, обеспечивающие получение после выглаживания специального рельефа поверхности, состояще-

го из сочетания канавок и выступов. Этот метод является более сложным, требует дополнительного расхода электроэнергии и рекомендуется в основном для упрочнения деталей, работающих в условиях трения. Полученные после выравнива-

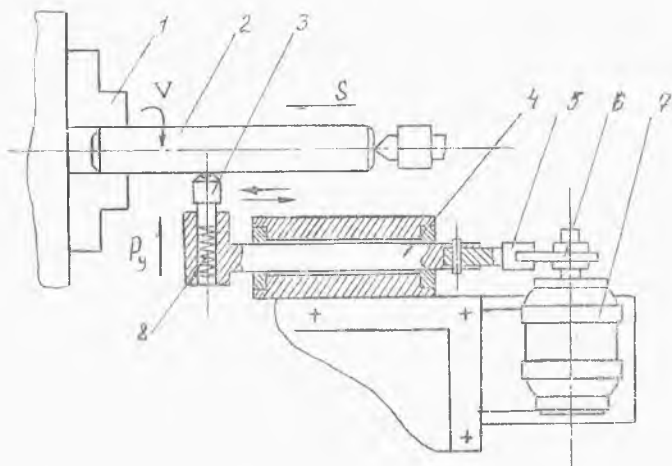


Рис. 8. Схема вибровыглаживания на токарно-винторезном станке: 1 — патрон станка; 2 — деталь; 3 — алмазный выглаживатель; 4 — штанга; 5 — тяга; 6 — эксцентрик; 7 — электродвигатель; 8 — пружина

ния канавки играют здесь роль масляных карманов, задерживающих на поверхности смазку и собирающих отходы процесса трения.

2.2.2. Формирование поверхностного слоя

Несмотря на технологическую разницу в рассмотренных методах выравнивания, физическая картина формирования поверхностного слоя принципиально одинакова и сводится к следующему.

Под действием радиального усилия P_y алмазный выглаживатель вдавлируется в металл, упруго и пластически его деформируя — сминая микровыступы поверхности. В месте контакта инструмента с деталью образуются высокие контактные давления, обуславливающие переход металла в состояние

текучности и его выпучивание. При движении выглаживателя относительно поверхности вращающейся детали (рис. 9) со стороны набегающих потоков металла образуется подвижный валик 2 (наплыв) в виде волны, огибающей переднюю часть сферы, от которой металл растекается в стороны и заполняет впадины, остающиеся от выглаживателя после каждого оборота детали.

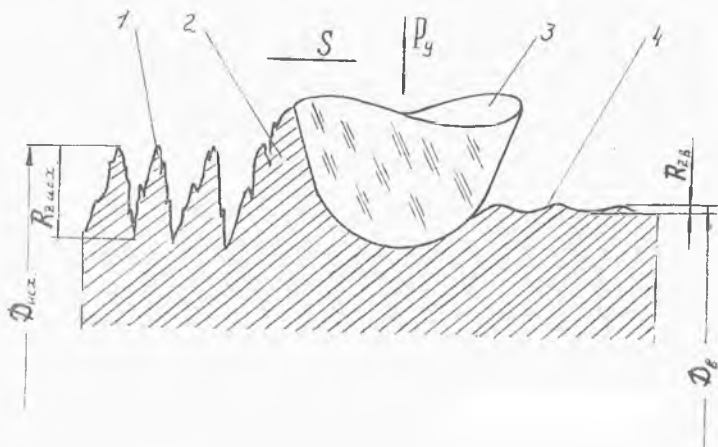


Рис. 9. Схема деформирования поверхностного слоя при алмазном выглаживании (в направлении подачи): 1—микронеровности исходной поверхности; 2—наплыв; 3—выглаживатель; 4—поверхность после выглаживания

2.2.3. Инструмент и оборудование

В качестве выглаживающего инструмента используются кристаллы естественного алмаза, закрепленные в металлических оправках (рис. 10). Использование естественного алмаза обусловлено его высокой твердостью (10 ед. по шкале Мосса) низким коэффициентом трения в паре со многими металлами ($\mu = 0,01 - 0,1$) и высокой теплопроводностью.

Крепление кристалла в оправе осуществляется с помощью пайки припаями ПСр 50 кд (ГОСТ 8190-56) или латунию марки ЛС 59-1. Ввиду анизотропии алмаза износостойкость его в различных направлениях неодинакова, поэтому закрепление в оправе должно производиться таким образом, чтобы ось выглаживателя совпадала с кристаллографической осью алмаза, определяющей направление максимальной твердости. В

настоящее время при изготовлении алмазных выглаживателей руководствуются отраслевой нормалью ОН 037-103-67, разработанной ВНИИАЛМАЗом. Нормаль определяет геометрические размеры выглаживателей, технологию и технические условия на их изготовление.

Рабочая поверхность кристалла выглаживателя заправляется по сфере или боковой поверхности цилиндра (реже по конусу или тору) и полируется до шероховатости по $R_z \leq 0,12$ мкм. Огранка и полировка осуществляется на станках ВЛ-С2, оснащенных специальными приспособлениями. Радиус рабочей поверхности выглаживателей обычно выбирается в пределах 0,5—4,0 мм. Сферические выглаживатели применяются гораздо чаще цилиндрических, так как позволяют выглаживать как наружные, так и внутренние поверхности деталей. Применение цилиндрических выглаживателей возможно лишь при упрочнении наружных поверхностей вращения.

Алмазное выглаживание может производиться практически на любых металлорежущих станках нормальной и повышенной точности при оснащении их соответствующими приспособлениями. Наиболее подходящими являются станки токарной группы. Для выглаживания плоскостей применяются станки строгальные и фрезерные.

2.2.4. Материал выглаживаемых деталей и режимы выглаживания

Алмазным выглаживанием можно обрабатывать практически все металлы, поддающиеся холодной пластической деформации, включая различные гальванические и химические покрытия (хром, никель, кадмий и т. д.). Исключения составляют титан, ниобий, цирконий. Эти металлы (или их сплавы) в результате значительной адгезии при выглаживании налипают на полированную поверхность кристалла алмаза, что приводит к резкому увеличению коэффициента трения и значитель-

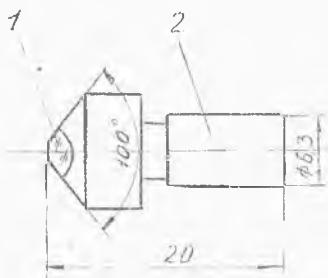


Рис. 10. Алмазный выглаживатель со сферической рабочей частью: 1 — кристалл алмаза; 2 — металлическая оправка

ному повышению температуры в зоне контакта. При достижении температуры 720°C алмаз графитизируется — выглаживатель выходит из строя.

Одним из важных требований, предъявляемых к материалу детали, является равномерность термической обработки. В противном случае после выглаживания появляется пятнистость, выражающаяся в неодинаковом упрочнении участков поверхности детали с разной исходной твердостью.

Основным параметром, оказывающим существенное влияние на качество поверхностного слоя после выглаживания, является контактное давление. Его величина определяется в первую очередь значениями радиального усилия P_y и размера выглаживателя R_B .

Ориентировочный расчет необходимого усилия P_y можно производить по формуле Торбило В. М. [5], полученной на основании приближенного решения задачи о скольжении жесткого радиусного выглаживателя по пластической поверхности,

$$P_y = c \varepsilon HV \left(\frac{D R_B}{D + R_B} \right)^2; \quad (17)$$

где c — постоянный коэффициент, учитывающий конкретные условия обработки;

ε — относительная глубина внедрения выглаживателя ($\varepsilon = \frac{h}{R_B}$, где h — абсолютная глубина внедрения);

HV — твердость обрабатываемого материала по Виккерсу;

D — диаметр обрабатываемой детали;

R_B — радиус рабочей части выглаживателя.

Формула (17) пригодна лишь для прикидочных расчетов. Определение оптимальной величины радиального усилия выглаживания P_y для того или иного материала уточняется опытным путем, исходя из заданной величины упрочнения и требований к рельефным характеристикам упрочненного поверхностного слоя.

В табл. 1 даны режимы алмазного выглаживания (жесткого или упругого) наиболее распространенных авиационных материалов для определенных размеров выглаживателей R_B .

Шероховатость поверхности, получаемая после алмазного выглаживания, зависит от размера выглаживателя R_B , величины продольной подачи S и может быть рассчитана по формуле

$$R_z = R_B - \sqrt{R_B^2 - \frac{S^2}{4}}. \quad (18)$$

Как видно, с увеличением подачи увеличивается и высота неровностей. Поэтому практический диапазон подач ограничивается интервалом 0,02—0,07 мм/об.

Скорость алмазного выглаживания не оказывает существенного влияния на качество упрочненной поверхности. Величина ее ограничивается температурой в зоне контакта и виброустойчивостью системы оправка — выглаживатель — деталь. Рабочий диапазон скоростей составляет 20—150 м/мин.

Алмазное выглаживание осуществляется с применением смазки, которая подается поливом на поверхность детали в зону контакта ее с выглаживателем. Наибольшее распространение получили смазки: масло индустриальное 10 и 20, масло веретенное 3, керосин.

Изменение размеров при алмажном выглаживании незначительное, поэтому специального припуска не предусматривают, а точность обработки обеспечивается операцией, предшествующей упрочнению.

Таблица 1

Режимы алмазного выглаживания

Материал	Твердость	R_v мм	P_y кгс	S мм/об	Шероховатость по R_a , мкм		Увеличение микротвердости, %
					до выглаживания	после выглаживания	
Д16Т	НВ 140	3,4	12	0,04	0,32	0,04	8,5
В95Т1	НВ 180	3,4	14	0,04	0,63	0,04	10
АК6	НВ 150	3,4	12	0,08	1,25	0,08	12
30ХГСНА	HRC 50	1,8	25	0,05	1,25	0,08	27
30ХГСА	HRC47	2,2	20	0,05	1,25	0,16	29
X18H10T	НВ 200	3,4	12	0,08	5,0	0,16	19
БрОФ6,5—0,15	НВ 180	3,4	15	0,08	2,5	0,16	12
45	HRC 52	1,2	14	0,04	1,25	0,16	30
ШХ15	HRC 61	1,2	20	0,04	1,25	0,16	40
40Х	HRC 54	1,2	12	0,04	0,63	0,16	—
12Х2Н4А	HRC 60	1,0	15	0,04	0,63	0,16	17
P18	HRC 61	1,0	14	0,04	0,63	0,16	32
4Х13	НВ 200	3,4	12	0,04	1,25	0,08	10
18ХГТ	HRC 61	1,0	15	0,04	0,63	0,16	17
ЭИ 702	НВ 350	3,4	22	0,08	1,25	0,08	21

2.3. Обкатывание шариками и роликами

Обработка поверхностным пластическим деформированием с помощью шариков и роликов является в настоящее время одним из наиболее распространенных способов упрочнения деталей машин.

В авиационной промышленности этот способ применяется для упрочнения разнообразной номенклатуры деталей планера и двигателей — валов, штоков, деталей управления и шасси, пальцев, осей, букс, зубчатых колес и т. д. При этом применяют, как правило, универсальное стандартное оборудование и сравнительно несложную оснастку.

Сущность обкатывания заключается в пластическом деформировании поверхностного слоя детали свободно вращающимся роликом или шариком. Сминая микровыступы исходной поверхности, шарик (ролик) производит наклеп поверхностного слоя и обеспечивает формирование в нем остаточных напряжений сжатия. После упрочнения значительно снижается шероховатость поверхности и образуется плавный микрорельеф, характеризующийся скругленными выступами и впадинами и исключая концентрацию напряжений.

Величина упрочнения (наклепа) определяется характеристиками материала, режимом обкатывания и может достигать 60%. Толщина наклепанного слоя составляет 0,3—2,0 мм. Величина остаточных напряжений сжатия, характер их распределения и глубина залегания для разных материалов различна и определяется режимами и схемой обкатывания. Практически глубина проникновения остаточных напряжений такая же, что и толщина наклепанного слоя. Максимальный уровень напряжений может достигать предела текучести материала.

Наклеп и сжимающие остаточные напряжения в сочетании с благоприятным микрорельефом поверхности обуславливают значительное повышение усталостной прочности деталей. Так, после обкатывания шариком на оптимальных режимах усталостная прочность сплава Д16АТ повысилась на 46%, АК6 — на 55%, В95 — на 30%, 30ХГСНА — на 27%. Особенно значительно повышается усталостная прочность деталей, имеющих концентраторы напряжений в виде рисок, пазов, канавок и т. д. В этом случае повышение предела выносливости упрочненной детали по сравнению с неупрочненной может достигать 200 и более процентов. Кроме повышения выносливости

упрочнение оказывает благоприятное влияние и на другие эксплуатационные свойства деталей: износостойкость, коррозионное и водородное растрескивание, малоцикловую выносливость и т. д.

2.3.1. Оборудование, инструмент, приспособления

Обкатывание шариком и роликом можно производить практически на любых металлорежущих станках с применением соответствующей оснастки. Наружные цилиндрические и конические (реже фасонные) поверхности обкатываются на станках токарной группы (токарно-винторезных, револьверных, карусельных, токарных автоматах). Раскатывание отверстий производится, как правило, на револьверных, сверлильных и расточных станках; раскатывание плоских поверхностей — на поперечно-строгальных и фрезерных станках.

Наибольшее распространение получило обкатывание на токарных станках пружинными обкатниками. Технологическая схема обкатывания на токарном станке похожа на схему алмазного выглаживания (см. рис. 6), только вместо пружинной оправки с выглаживателем устанавливается приспособление (обкатник) 6, имеющее на конце свободно вращающийся шарик или ролик.

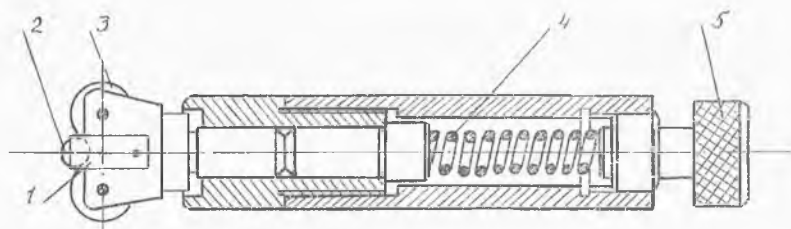


Рис. 11. Конструкция шарикового обкатника: 1 — бронзовая скоба; 2 — шарик; 3 — подшипник; 4 — пружина; 5 — регулятор усилия обкатывания

Одна из конструкций такого обкатника показана на рис. 11. Величина необходимого усилия обкатывания обеспечивается тарированной пружиной и может изменяться в зависимости от величины ее сжатия.

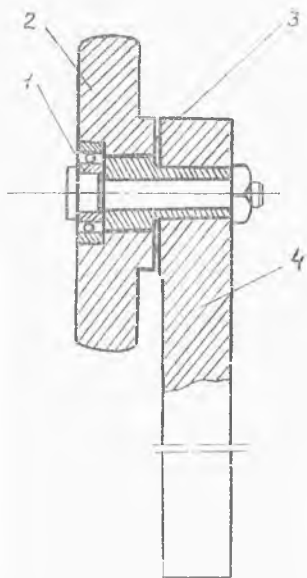


Рис. 12. Обкатник с жестким закреплением ролика:
1 — подшипник; 2 — ролик;
3 — шарик; 4 — державка

На рис. 12 показана конструкция однороликового обкатника с жестким закреплением ролика относительно станка. Величина усилия обкатывания создается перемещением поперечного суппорта. Для раскатывания отверстий малого диаметра ($D \leq 10$ мм) применяются раскатники с роликами, имеющими рабочую поверхность цилиндрической формы (рис. 13). Деформирующие ролики 2 в процессе обработки перекатываются по опорному валлику 3 и удерживаются от выпадания пробкой 1. Опорный валлик, на который опираются ролики, не передает крутящего момента и может быть предельно малого диаметра. Для изменения рабочего диаметра раскатника необходимо изменять диаметр деформирующих роликов.

Корпуса обкатников и раскатников могут изготавливаться

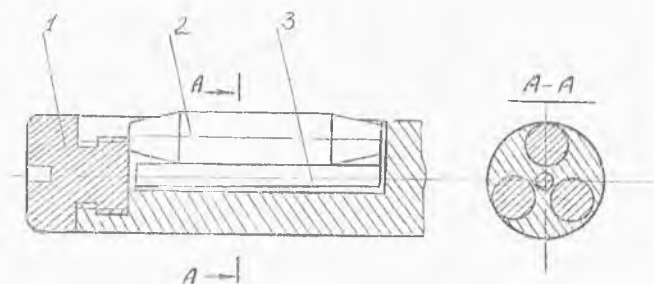


Рис. 13. Раскатник для упрочнения отверстий малого диаметра ($D \geq 10$ мм)

из любой конструкционной стали. Рабочая поверхность роликов может быть профилированной в зависимости от конфигурации детали. Материалом для изготовления роликов служат инструментальные и легированные стали (У10, У12, ХВГ, Х12М), обеспечивающие твердость $HRC\ 58\text{--}62$. Для шариковых обкатников обычно используются стандартные шарики из ШХ15 ($HRC\ 62\text{--}64$) диаметром от 5 до 30 мм, применяющиеся при изготовлении шариковых подшипников.

2.3.2. Выбор режимов обкатывания

Основными параметрами, характеризующими процесс обкатывания и определяющими качественные характеристики упрочненного поверхностного слоя, являются: контактное давление p , усилие обкатывания P_n , площадь контакта F_k , продольная подача s , размеры шарика (ролика) R и скорость обкатывания v .

Величина контактного давления p выбирается экспериментальным путем и зависит прежде всего от типа упрочняемого материала и размеров инструмента. В табл. 2 приведены величины оптимальных контактных давлений, рекомендуемые профессором Папшевым Д. Д. [6] для обкатывания сталей шариком диаметром 10 мм ($R=5$ мм).

Таблица 2

Контактные давления и глубина наклепа при обкатывании сталей шариком диаметром 10 мм

Структура материала	Твердость	Контактное давление, кгс/мм ²	Глубина наклепа, мм
Ферритно-перлитная	мягие средней твердости твердые	160—190	1,8—2,3
		190—210	1,5—2,0
		200—220	1,2—1,7
Мартенситная	$HRC < 58$ $HRC\ 58\text{--}62$ $HRC > 62$	250—280	0,8—1,4
		270—290	0,8—1,4
		280—300	0,8—1,4
Трооститно-сорбитная	$HRC < 48$ $HRC\ 48\text{--}52$	210—240	0,3—0,7
		230—250	0,3—0,7

По данным Проскурякова Ю. Г. [7], величина контактного давления, необходимого для нормального протекания процесса обкатывания, может ориентировочно рассчитываться по формуле

$$p = (1,8-2,1) \sigma_T, \quad (19)$$

где σ_T — предел текучести материала.

Для расчета величины нормального усилия обкатывания можно рекомендовать несколько расчетных формул, полученных различными авторами, исходя из механических характеристик материала, размеров инструмента и принятой схемы обработки.

Формула, предложенная Папшевым Д. Д.:

$$P_{II} = \pi p (R_{ш} \sin \alpha)^2, \quad (20)$$

где p — контактное давление;

$R_{ш}$ — радиус шарика;

α — среднее значение угла вдавливания.

Данное выражение получено в результате интегрирования нормальных контактных напряжений по площади контакта шарика с обрабатываемой поверхностью и позволяет с достаточной точностью по заданному давлению p и размерам шариков цилиндрических поверхностей шариками диаметром α подсчитать силу P_{II} . Величина угла α при обкатке наружных 5—10 мм находится в пределах $5^\circ 30' - 7^\circ$ [6].

Формула Кудрявцева И. В.

$$P_{II} = 50 + \frac{D^2}{6}, \quad (21)$$

где D — диаметр обрабатываемой детали, равный диаметру накатного шарика, мм.

Эта формула получена на основании экспериментальных исследований и рекомендуется для расчета усилия P_{II} , исходя из обеспечения наивысшей усталостной прочности детали.

В табл. 3 приведены расчетные зависимости для определения силы P_{II} , предложенные Проскуряковым Ю. Г. [7].

Практически величина P_{II} выбирается в пределах 10—7500 кгс.

Высоту неровностей R_z для упрочненной поверхности можно приблизительно рассчитать, используя выражение [6]:

$$R_z = \frac{s^2}{8 R_{ш}} \left(1 - \frac{k-1}{2k} \right) k_\epsilon, k_p, \quad (22)$$

где s — продольная подача;

k — коэффициент, характеризующий увеличение радиуса впадины микропрофиля;

k_z — коэффициент, зависящий от пластических свойств материала;

k_p — коэффициент, зависящий от давления в зоне контакта.

При нагрузке на шарик, равной 125—250 кгс, $k=2,1—2,6$. Для оптимальных режимов обкатывания $K_p=1,0$ а $k_z=1,1—2,1$.

При обкатывании роликом высота неровностей R_z упрочненной поверхности может быть рассчитана по формуле, приведенной в [7]:

$$R_z = R_{z \text{ исх}} [1 - k_c (104 - \sigma_T)] \lg \frac{p}{k} . \quad (23)$$

где $R_{z \text{ исх}}$ — высота неровностей исходной поверхности;

k_c — постоянный коэффициент;

p — контактное давление;

λ — коэффициент, зависящий от характера распределения напряжений в очаге деформаций.

Для оптимальных условий обкатывания $k_c=0,00715$, $\lambda=6,5$.

Шероховатость поверхности (обкатанной роликами и шариками) может быть достигнута по R_z равной 0,5—1,0 мкм, при исходной — 8—10 мкм. Операциями, предшествующими обкатыванию, могут быть шлифование, чистовое точение или чистовое фрезерование.

Продольная подача s оказывает существенное влияние на упрочнение и шероховатость поверхности. При обкатывании шариком для создания равномерного упрочнения рекомендуется применять следующие подачи [6]:

для мягких сталей $s=0,1—0,2$ мм/об;

для закаленных сталей $s=0,06—0,12$ мм/об.

При обкатывании роликом величина подачи может быть рассчитана по формуле

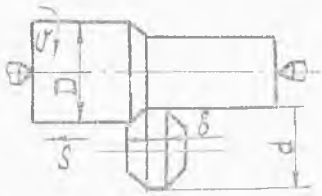
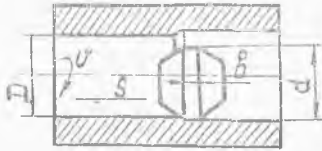
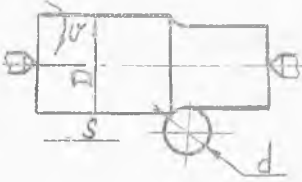
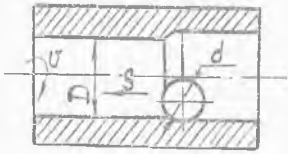
$$s = (0,3—0,5) b, \quad (24)$$

где b — ширина цилиндрической ленточки ролика (см. табл. 3).

Практически подача может выбираться в широком диапазоне от 0,1 до 1,5 мм/об в зависимости от конструкции ролика и необходимой величины шероховатости упрочненной поверхности.

Таблица 3

Выбор усилия обкатывания для разных схем деформирования поверхности

Вид обкатывания	Схема обработки	Расчетные формулы для определения усилий обкатывания (раскатывания), кгс
ролик		$p = \frac{Dbp^2}{0,126 E \left(\frac{D}{d} - 1 \right)}$
		$p = \frac{Dbp^2}{0,18 E \left(\frac{D}{d} - 1 \right)}$
шариком		$p = \left(\frac{dp}{0,045 E} \right)^2 p$ <p>при $\frac{D}{d} \geq 10$</p>
		$p = \left[\frac{Dd}{0,054 \left(\frac{D}{d} - 1 \right) E} \right]^2 p$

Скорость обкатывания оказывает несущественное влияние на характеристики упрочнения. Однако при больших скоростях обработки ($v > 100$ м/мин) происходит значительное тепловыделение, приводящее к смещению максимальных сжимающих остаточных напряжений (подслоного максимума) в глубину деформированного слоя. Последнее, как указывалось выше, отрицательно сказывается на работоспособности деталей. Исходя из этого, скорость обкатывания необходимо выбирать в пределах 60—80 м/мин [6].

Применение смазки при обкатывании обуславливается необходимостью повышения стойкости шариков (роликов), уменьшения мощности, затрачиваемой на обкатывание и улучшения микрорельефа поверхности.

Применяют следующие виды смазок: трансформаторное масло, сульфозфрезол, мазут, индустриальное масло, керосин. Подбор смазок производится опытным путем на образцах.

Припуск под обкатывание в значительной мере зависит от марки обрабатываемого материала и режимов упрочнения. Во многих случаях величина изменения диаметра укладывается в поле допуска окончательного размера и в этом случае специального припуска под обкатывание можно не предусматривать. По данным Шнейдера Ю. Г. [8], величину припуска под обкатывание на оптимальных режимах можно приближенно рассчитать по формуле

$$Z_{\text{об}} = k(R_{z_{\text{исх}}} - R_z), \quad (25)$$

где $R_{z_{\text{исх}}}$ — высота неровностей исходной поверхности;

R_z — высота неровностей упрочненной поверхности;

k — постоянный коэффициент ($k = 1,1—1,5$).

Контроль качества упрочнения производят в лабораторных условиях путем измерения микротвердости и остаточных напряжений сжатия.

2.4. Центробежная обработка

Данный способ ШПД основан на использовании кинетической энергии стальных шариков, свободно перемещающихся под действием центробежной силы в радиальных отверстиях (пазах) специального приспособления, вращающегося над обрабатываемой поверхностью. Эти приспособления получили название ротационных упрочнителей, они применяются для об-

работки цилиндрических, конических (наружных и внутренних), плоских и фасонных поверхностей. Ротационные упрочнители могут успешно использоваться для обработки большой номенклатуры деталей: осей, штоков, поршней, валов, бус, подшипников скольжения и т. д.

В качестве оборудования могут применяться токарные, шлифовальные, фрезерные и расточные станки, обеспечивающие необходимую скорость упрочнения.

На рис. 14 показана схема использования ротационного упрочнителя при обработке деталей на токарно-винторезном станке.

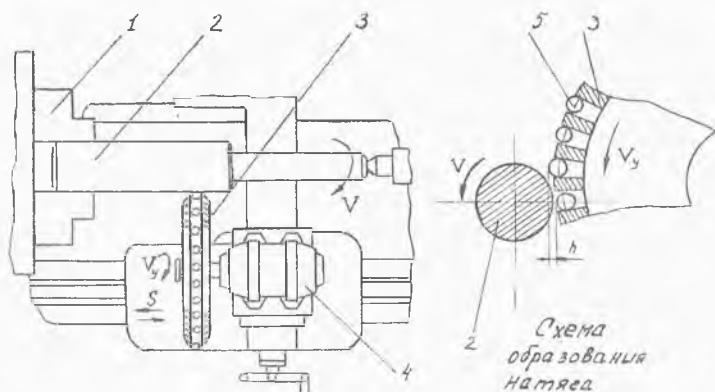


Рис. 14. Схема обработки деталей ротационным упрочнением на токарно-винторезном станке: 1—патрон станка; 2—деталь; 3—ротационный упрочнитель; 4—электродвигатель; 5—шарики упрочнителя

Упрочнитель 3 с шариками 5 получает вращение от специального электродвигателя 4, установленного на место резцедержателя; деталь 2 и упрочнитель вращаются в одну сторону. Встречая на своем пути заготовку, движущуюся навстречу шарикам, каждый шарик с силой ударяется об обрабатываемую поверхность и производит ее наклеп. Центробежная обработка является динамическим способом упрочнения, реализующим контактно-сдвиговую схему деформирования поверхностного слоя.

Величина натяга h выбирается в пределах 0,1—0,3 мм и обеспечивается за счет установки упрочнителя на определенном расстоянии от детали с помощью рукоятки поперечной подачи станка.

Диапазон чисел скоростей электродвигателя и диаметр диска упрочнителя выбираются такими, чтобы обеспечить скорость обработки в пределах 20—40 м/с.

Скорость упрочнения (обработки) определяется по формуле

$$v_y = \frac{\pi D n}{1000 \cdot 60} \text{ м/с}, \quad (26)$$

где D — наружный диаметр упрочнителя (по шарикам), мм;
 n — число оборотов электродвигателя, мин.

Окружная скорость детали рассчитывается по формуле

$$v_d = \frac{\pi d n_d}{1000} \text{ м/мин}, \quad (27)$$

где d — диаметр обрабатываемой детали, мм;
 n_d — число оборотов детали, об/мин.

Величина оптимальной продольной подачи s , необходимая для сплошного упрочнения поверхности детали, определяется по формуле

$$s = s_z z \frac{n}{n_d} \text{ мм/об}, \quad (28)$$

где s_z — продольная подача на один шарик, мм/шар;
 z — число шариков в упрочнителе.

Величина продольной подачи на один шарик (s_z) зависит от ширины контактного следа на упрочняемой поверхности и количества шариков в упрочнителе.

Степень деформации поверхности шариком обуславливается силой удара последнего в единицу времени, т. е. импульсом

$$Q = \frac{\pi n G (1+k)}{30 g} \sqrt{\frac{h(D+d)(D-d_m)}{d+d_m}}, \quad (29)$$

где Q — импульс удара, гс/с;

G — вес шарика, гс;

k — постоянный коэффициент (зависит от конструктивных особенностей упрочнителя);

g — ускорение силы тяжести, мм/с²;

h — натяг, мм;

d_m — диаметр шарика, мм.

Режим обработки некоторых деталей ротационными упрочнителями приведен в табл. 4 [7]. Необходимо отметить, что неверный выбор режимов упрочнения может привести или к недостаточному наклепу поверхности, или к ее перенаклепу. Последнее является более опасным, так как возникшие при наклепе микротрещины смогут явиться при эксплуатации детали очагами зарождения усталостных трещин.

Центробежная обработка ведется, как правило, с применением смазки, состоящей из смеси керосина (40%) и веретенного масла (60%). Смазка подается поливом в момент обработки непосредственно в зону контакта и на шарики.

Специального припуска на обработку не оставляют, так как изменение диаметра детали после упрочнения незначительное и составляет ± 1 —5 мкм. Практическая достигаемая точность обработки деталей ротационными упрочнителями — 2—3 класс.

Предварительная обработка поверхности под упрочнение производится чистовым точением, сверлением, или шлифованием и должна обеспечить шероховатость по R_a не более 1,5 мкм.

Для получения равномерного наклепа упрочняемая поверхность детали должна иметь биение не более 0,03 мм, а конусность, эллипсность и бочкообразность — не более 0,06 мм.

Установлено, что микротвердость (наклеп) поверхностного слоя детали после центробежного упрочнения повышается в среднем для стали 25 на 45%, чугуна — на 30—60%, латуни — на 60%, силумина — на 50%. Глубина наклепа составляет 0,6—1,0 мм. Шероховатость упрочненной поверхности составляет по R_a 0,1—0,2 мкм.

На рис. 15 показана конструкция шарикового ротационного упрочнителя для работы на токарных или круглошлифовальных станках. Корпус упрочнителя и сепаратор могут изготавливаться из любой конструкционной стали с твердостью не менее HRC 35...40. Сепаратор 2 представляет собой два точно отшлифованных тарельчатых диска, имеющих небольшую завальцовку по периферии для удержания шариков. Гайка 3 служит для регулировки ширины радиального паза. Назначение отражателя 6 и резиновой прокладки 5 — гасить скорость шарика, которую тот приобретает, отскакивая от детали в момент удара при упрочнении. Изготавливаются отражатели из стали марок ШХ15 и 9ХС и закаляются до твердости HRC 55...60.

Таблица 4

Условия и режимы обработки некоторых материалов центробежным способом

Марка материала детали	Режим упрочнения						Твердость по Виккерсу		Метод обработки	Шероховатость поверхности	
	число оборотов детали, мин	диаметр упрочняющего тела, мм	скорость упрочняющего тела, м/с	подача, об/мин	патя, мм	кол-во ударов на 1 мм ²	до наклепа, %	повышение после наклепа, %		до упрочнения, мкм	после упрочнения, мкм
18НМА	500	300	28,5	0,04	0,2	5	360	21	Шлифование	0,63	0,2
45	500	270	25,7	0,08	0,15	14	412	17	То же	0,63	0,2
25	500	270	25,7	0,16	0,25	12	159	55	—, —	0,63	0,2
Чугун серый	500	270	15,5	0,08	0,10	15	210	30	—, —	0,63	0,2
ЛС59	500	270	12,7	0,08	0,10	17	128	61	Точение	2,5	0,2
Бр.АЖМ	250	270	15,5	0,08	0,05	18	150	37	То же	0,63	0,2
Д1	500	270	12,7	0,08	0,15	12	132	30	—, —	1,25	0,2

На практике для ротационных упрочнителей применяют шарики диаметром от 5 до 16 мм. Материал шариков — ШХ15, твердость — *HRC* 60...62. Количество шариков и их диаметр выбираются в соответствии с диаметром упрочнителя и предполагаемыми режимами обработки.

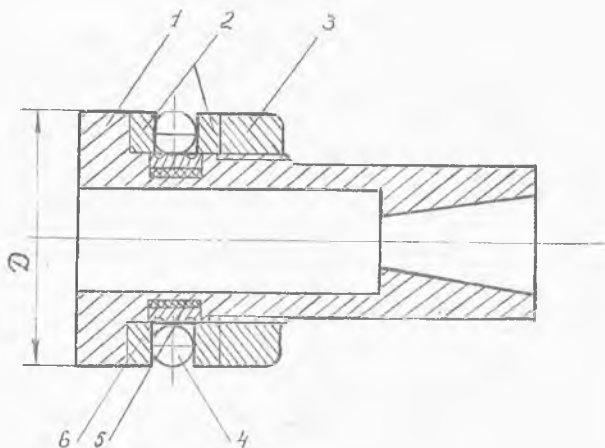


Рис. 15. Конструкция ротационного упрочнителя: 1 — корпус упрочнителя; 2 — сепаратор; 3 — гайка; 4 — шарик; 5 — резиновая прокладка; 6 — отражатель

Контроль качества упрочнения осуществляется путем измерения величины наклепа и остаточных напряжений в образцах, упрочненных на тех же режимах, что и деталь.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 18296-72. Обработка поверхностным пластическим деформированием. Термины и определения.
2. Маталин А. А. Технологические методы повышения долговечности деталей машин. Киев, «Техника», 1971, с. 257.
3. Саверин М. М. Дробеструйный наклеп. М., Машгиз, 1955, с. 312.
4. Петросов В. В. Повышение долговечности и надежности деталей гидродробеструйной обработкой. «Вестник машиностроения», 1977, № 4, 60 с.
5. Горбило В. М. Алмазное выглаживание. М., «Машиностроение», 1972, 104 с.
6. Папшев Д. Д. Упрочнение деталей обкаткой шариками. М., «Машиностроение», 1968, 132 с.
7. Проскуряков Ю. Г. Чистовая обработка давлением.—В сб.: Справочная книга по отделочным операциям в машиностроении. Л., Лениздат, 1966, 544 с.
8. Шнейдер Ю. Г. Чистовая обработка металлов давлением. М.—Л., Машгиз, 1963, 310 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТ- НЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ	5
2. МЕТОДЫ ППД	8
2.1. Обработка дробью	8
2.1.1. Теоретические основы обработки дробью	10
2.1.2. Технология обработки, оборудование	13
2.2. Алмазное выглаживание	18
2.2.1. Методы алмазного выглаживания	18
2.2.2. Формирование поверхностного слоя	21
2.2.3. Инструмент и оборудование	22
2.2.4. Материалы выглаживаемых деталей и режимы выглаживания	23
2.3. Обкатывание шариками и роликами	26
2.3.1. Оборудование, инструмент, приспособления	27
2.3.2. Выбор режимов обкатывания	29
2.4. Центробежная обработка	33
Литература	38

Анатолий Сергеевич БЕЛЯЕВ

ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ
АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Конспект лекций

Редактор Л. Соколова

Техн. редактор Н. Каленюк

Сдано в набор 5.12.78 г. Подписано в печать 19.02.79 г.
ЕО00144. Формат 60×84¹/₁₆. Бумага оберточная белая.
Гарнитура литературная. Печать высокая.
Физ. л. 2,5. Усл. п. л. 2,32. Уч.-изд. л. 2,3.
Тираж 800 экз. Зак. № 2. Цена 8 коп.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт им. С. П. Королева,
Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.

Типография УЭЗ КуАИ, Куйбышев, ул. Ульяновская, 18.