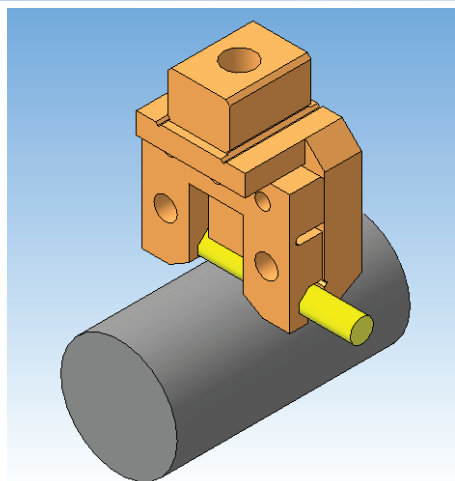
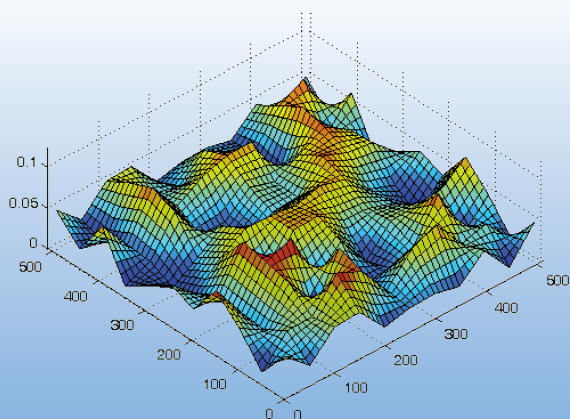


Н.М. Бобровский  
И.Н. Бобровский



# ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПОВЕРХНОСТНО-ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

Учебное пособие



Тольятти  
Издательство ТГУ  
2013

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Тольяттинский государственный университет  
Институт машиностроения  
Кафедра «Оборудование и технологии машиностроительного  
производства»

Н.М. Бобровский, И.Н. Бобровский

**ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН  
ПОВЕРХНОСТНО-ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ**

Учебное пособие

Тольятти  
Издательство ТГУ  
2013

УДК 621.7:539.374:669.131.7

ББК 34.59я73

Б725

Рецензенты:

д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой  
«Технология машиностроения» Самарского государственного  
технического университета *Н.В. Носов*;  
канд. техн. наук, доцент Тольяттинского государственного  
университета *А.В. Щипанов*.

**Б725** Бобровский, Н.М. Инновационные технологии механической обработки деталей машин поверхностно-пластическим деформированием : учеб. пособие / Н.М. Бобровский, И.Н. Бобровский. — Тольятти : Изд-во ТГУ, 2013. — 80 с. : обл.

В учебном пособии приведены сведения об инновационных технологиях обработки поверхностно-пластическим деформированием. Показаны их основные направления развития и применения в машиностроении.

Предназначено для магистрантов, обучающихся по направлению 151900 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» (магистерская программа «Технология автоматизированного машиностроения») по дисциплине «Технология наукоемких машиностроительных производств».

УДК 621.7:539.374:669.131.7

ББК 34.59я73

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Тольяттинского государственного университета.

© ФГБОУ ВПО «Тольяттинский  
государственный университет», 2013

## ВВЕДЕНИЕ

В отечественном машиностроении происходит технологическая модернизация, направленная на повышение эффективности производства и конкурентоспособности выпускаемой продукции. Освоение инновационных технологий обработки деталей обеспечивается преимущественно за счет приобретения импортного оборудования и инструмента и в меньшей степени путем внедрения новых технологических процессов, созданных в нашей стране.

Можно отметить еще одну особенность современного развития отечественного машиностроения: его акценты смещены в сторону совершенствования высокотехнологичных отраслей, ориентированных на мелкосерийное производство. Не менее важной и актуальной задачей для экономики страны и ее престижа является внимание к производству продукции, выпускаемой в больших объемах, качество которой затрагивает интересы большого числа потребителей.

И наконец, еще об одной тенденции развития технологии машиностроения, в которой наряду с уже традиционными требованиями постоянного повышения производительности, точности и качества обработки деталей все активнее выдвигается условие экологичности их изготовления.

В настоящее время уже внедрены экологичные импортозамещающие инновационные технологии обработки деталей, используемые в том числе в массовом производстве. Одной из таких технологий является обработка поверхностно-пластическим деформированием (ППД) с возможностью исключения смазывающе-охлаждающих технологических средств (СОТС).

Изучение материала, приведенного в настоящем пособии, опирается на предшествующие дисциплины «Технология автомобиле- и тракторостроения», «Технология машиностроения».

## **1. ФИЗИКА ПРОЦЕССА И ОБЗОР СПОСОБОВ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТНО-ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ**

В технологии машиностроения за последнее время заметно увеличился удельный вес процессов обработки ППД. Большой интерес к методам ППД связан с их возможностью совмещать в одном процессе эффекты отделочной и упрочняющей обработки, что позволяет заменять операции, например, тонкого точения, шлифования или полирования на финишную обработку упрочнением.

Научными исследованиями обосновано, а практический опыт применения методов ППД подтвердил еще одно важное их преимущество – повышение эксплуатационной надежности обработанных деталей.

Повышение надежности и долговечности изделий машиностроения обусловлено высоким качеством обработки и достигается за счет увеличения конструктивной и усталостной прочности деталей после упрочнения, контактной жесткости, износостойкости и выносливости их рабочих поверхностей и др.

Сочетание указанных достоинств отделочно-упрочняющей обработки с возможностью исключения СОТС способствует приоритетности выбора методов ППД при модернизации машиностроительного производства для повышения его эффективности, экологичности и конкурентоспособности.

В целях экологической безопасности производства и ожидаемого экономического эффекта начиная с 90-х годов прошлого века многие фирмы Европы совместно с институтами активно занимаются разработкой теоретических основ и практических способов обработки резанием без применения смазывающе-охлаждающей жидкости (СОЖ). Достаточно привести один пример: в Германии с весны 1994 по 2002 год осуществлялся крупный проект «сухая обработка», охватывающий фундаментальные научные разработки, разработку и оптимизацию технологий в отношении инструмента, оборудования и процесса для обработки различных материалов. Проект реализовывался под эгидой Федерального Министерства по обучению, науке, научным исследованиям и технологии. В проекте участвовали 24 фирмы («Даймлер Крайслер», «Гюринг», «Хюллер Хиль», «Мапал» и т. д.), институты и инновационно-технологические центры, распределенные по 5 группам, каждой из которых руководил представитель промышленной фирмы.

Исследовались такие направления, как сухое резание, точение, фрезерование, сверление, технологии сухой обработки в целом. Побудительным мотивом на переход к бесшумной обработке в Европе является и тот факт, что потребление СОЖ растет по экспонентной зависимости.

Совместная работа институтов и фирм сблизила направленность фундаментальных разработок и проведение широких практических экспериментальных работ непосредственно на фирмах, теоретические и экспериментальные данные для практических работ по разработке инструментов, режимов обработки и оборудования, обеспечила оперативную обратную связь. Фирмы, работая «для всех», работали одновременно самостоятельно в своих интересах. Для выполнения этих работ США и Европейский союз создали независимые программы, в которые Россия не была принята в качестве участника для проведения этих исследований.

В соответствии с отмеченными тенденциями и особенностями развития машиностроения и его научно-технического обеспечения можно сформулировать приоритеты данного учебного пособия. Оно направлено на представление существующих методов ППД, их сравнение и анализ; рассмотрены инновационные методы обработки, способные обеспечить прорывное увеличение качества и надежности продукции.

Для условий массового производства, например автомобилей, актуальна проблема повышения эффективности, экологичности и конкурентоспособности изготовления изделий, особенно при увеличении спроса на отечественную продукцию. В настоящее время она решается, в том числе путем замены процессов финишной обработки с обильным принудительным охлаждением на методы ППД без применения СОЖ. Они обеспечивают высокую надежность автоматизированного выполнения заданных требований к точности и качеству упрочняемых деталей за очень короткое время – до 6...10 с, соответствующее такту выпуска до миллиона изделий в год.

Для указанных условий производства, в частности для автомобилестроения, ключевой проблемой внедрения инновационной технологии становятся ее повышенная надежность и стабильность, то есть уверенность в безусловном выполнении всех необходимых требований к точности, качеству чрезвычайно быстрой обработки огромного количества деталей – до 600 000 и более в год только одного типа при их

непрерывном изготовлении в течение нескольких лет. При отсутствии влияния оператора на ход технологического процесса выполнение даже относительно несложных требований по точности формы и размеров обрабатываемой поверхности, ее шероховатости и других регулируемых характеристик качества поверхностного слоя требует его тщательной научно-исследовательской подготовки.

Целью данного учебного пособия является получение студентом основ знаний об инновационных методах обработки пластическим деформированием, физике процессов, протекающих при ППД, возможных схемах и методах реализации процесса для успешного решения задачи по модернизации и совершенствованию производства автомобильных деталей.

В пособии показаны особенности различных схем ППД, в том числе на основе передового опыта внедрения инновационных разработок на промышленные предприятия (прежде всего механосборочное производство ОАО «АВТОВАЗ»). Представлен также материал на основе справочных и литературных данных и результатов исследований, выполненных с участием авторов в Тольяттинском государственном университете, в том числе по государственным контрактам.

Значительная часть пластических и прочностных свойств металлов и изделий из них зависит от процессов, идущих в их приповерхностных слоях. Прежде всего это такие очевидные свойства, как износостойкость при трении, разрушение при воздействии химически активных веществ, газовых и жидкостных потоков, тепловых и радиационных ударов и т. д. Поверхностная обработка металлов – резание лезвийным инструментом, шлифование, полирование, процессы поверхностного пластического деформирования и т. д. – определяется в основном только параметрами обрабатываемого слоя. Известно, что зарождение усталостных трещин также происходит в приповерхностных слоях. Поэтому эксплуатационные свойства деталей машин и инструментов, подверженных воздействию периодических, контактных и химических нагрузок, зависят прежде всего от свойств их приповерхностных слоев.

Исследования последних лет показали, что изменения в приповерхностных слоях влияют и на объемные пластические и прочностные свойства. Наиболее известным является эффект Ребиндера – изменение прочностных свойств под воздействием на поверхность агрессив-

ных сред. Следует отметить также изменение скорости пластической деформации металлов после их полирования, изменения химического состава поверхности или отжига приповерхностных дефектов; исчезновение зуба текучести после споллирования некоторого слоя; влияние высокого вакуума на диаграммы растяжения и т. д.

С точки зрения физики твердого тела поверхность металла после обработки представляет собой многослойный композит. Первый поверхностный слой в несколько межатомных расстояний – это материал с измененными упругими постоянными, ангармонизмом, спектром колебаний, межатомными расстояниями и т. д. Второй слой толщиной от тысячи ангстрем до нескольких микрон обычно отличается по химическому составу. Пластическая деформация и сопровождающая ее ускоренная диффузия примесей существенно усиливают этот эффект. Третий слой имеет толщину от 20 до 100 и более микрон и отличается измененной дефектной структурой. Основными причинами этого изменения являются упругое взаимодействие дефектов с поверхностью, отличие силы взаимодействия между дефектами и закономерностей их размножения в приповерхностных слоях. Как следствие, формируются дислокационные структуры с другой плотностью, большим избытком дислокаций одного знака, большей склонностью к дислокационным неустойчивостям, большими взаимными разворотами микрообъемов. Как стало ясно в последние годы, масштаб корреляции между отдельными микрообъемами также изменяется.

Кроме этих трех слоев на свойства приповерхностных объемов могут оказывать влияние еще и такие факторы, как фазовый состав, макроскопическое напряженное состояние, поверхностные текстуры деформаций, возможность динамической и термической рекристаллизации, наличие поверхностных микротрещин и пор, микрорельеф поверхности и многие другие. Интенсивность этих факторов и соотношения между ними и их характеристическими длинами и определяют пластические и прочностные свойства приповерхностных слоев.

Развитие технологии машиностроения для достижения наилучшего упрочнения поверхности идет по четырем основным направлениям:

- 1) нанесение поверхностных покрытий на детали и инструмент;
- 2) создание слоев с достаточно интенсивными сжимающими напряжениями;



- 3) формирование структур дефектов, зерен, химического состава;
- 4) оптимизация рельефа поверхности.

Для улучшения механических свойств поверхностей изделий и инструментов используют как традиционные методы обработки металлов, так и новые технологии, появившиеся в последние годы. Отметим главные.

1. *Термообработка*. Она широко используется как для упрочнения изменением фазового состава, так и для рекристаллизации и химического упрочнения за счет диффузии примесей в приповерхностный слой. В последнее время в термообработке появились новые направления, такие как термоудар, приводящий к измельчению зерен и фазовых включений, отжиг микротрещин с целью восстановления свойств уже работавших деталей.

2. *Механическая обработка поверхности*, которая может быть осуществлена как наклепом поверхностного слоя различными инструментами, так и снятием поверхностных слоев, созданием поверхностей с определенным рельефом и т. д. В этой области в последние годы особое внимание привлекают создание периодических рельефов и обработка алмазным инструментом (например, хонингование), которая может сопровождаться упрочнением поверхности за счет внедрения в нее алмазных частиц.

3. К новым методикам можно отнести *обработку металлических поверхностей различными потоками*. Сюда входят лазерное и обычное излучение, электронные и ионные пучки, имплантация. Эти технологические приемы позволяют сочетать сильный локальный тепловой удар с химическими воздействиями и пластической деформацией приповерхностных слоев.

4. Наконец, *нанесение покрытий* является наиболее простым, в принципе, способом изменения свойств поверхностей. Сейчас наряду с задачей упрощения процедуры нанесения покрытий стоит проблема (физическая и технологическая) создания многослойных покрытий, обеспечивающих сразу комплекс различных свойств.

Большая часть применяемых технологий обработки поверхностей разработана чисто эмпирически. Было обнаружено, что любая из перечисленных выше обработок наиболее эффективна в узком интервале параметров. Например, отжиг приповерхностных пор приводит

к существенному улучшению механических свойств, только если он проводится в интервале 20–30 градусов. При температурах ниже оптимальной поры практически не отжигаются, а при более высоких – начинаются релаксационные процессы в дислокационной структуре, приводящие к разупрочнению.

Обычно оптимизации подлежат сразу несколько параметров. Например, при лазерной обработке можно изменять энергию и мощность пучка, фокусировку, параметры сканирования. Практически для всех способов обработки превышение оптимальных величин параметров ведет к процессам разрушения или размягчения приповерхностного слоя. Поэтому даже феноменологический подбор оптимальных параметров является сложной задачей, причем для каждого нового материала, а иногда и для новой детали эксперимент приходится проводить заново. Наилучшие результаты сейчас получены для крупносерийных изделий, например для резцов с покрытиями.

В большинстве случаев наибольший эффект следует ожидать от комбинированного применения нескольких технологий. Однако число параметров при комбинированной обработке столь велико, что их оптимизация на чисто феноменологической основе невозможна.

Из всего сказанного следует, что наиболее актуальной задачей сейчас является создание физических основ технологии упрочнения поверхности металлов.

Задача повышения эксплуатационной надежности деталей машин приобретает все большее значение в связи с увеличением механической и тепловой напряженности современных конструкций. Вместе с тем увеличение статической прочности деталей не всегда равнозначно повышению их долговечности, так как с ростом временного сопротивления увеличивается вероятность усталостного и хрупкого разрушения деталей. Использование высокопрочных сталей ограничивается большой их чувствительностью к концентрации напряжений, различного рода дефектам поверхности, загрязненности неметаллическими включениями, наводораживанию. Поэтому, когда наряду с высокими величинами упругости детали должны обладать большим сопротивлением переменным и динамическим нагрузкам, коррозии под напряжением, использование высокопрочных сталей оказывается малоэффективным.

Из многочисленного арсенала современных средств упрочнения (которые не одинаково, а иногда в разном направлении влияют на отдельные свойства) не всегда легко выбрать оптимальный вид упрочнения для данного конкретного случая. Сравнение эффективности различных способов повышения эксплуатационной стойкости деталей (ориентированный холодный наклеп, различные виды химико-термической обработки (ХТО) и термомеханической обработки (ТМО), поверхностный наклеп, рафинирование стали и др.) дает возможность наметить области их рационального применения с учетом факторов, лимитирующих надежность деталей в данных условиях.

К настоящему времени установлено, что конструктивная прочность изделий определяется во многом структурой и свойствами поверхностного слоя. Для упрочнения поверхностного слоя деталей применяются различные методы, к основным из которых относятся поверхностная закалка, ХТО, поверхностное пластическое деформирование (ППД), поверхностная термомеханическая обработка (ПТМО).

К категории методов упрочняющей обработки поверхности следует отнести методы деформационного упрочнения. Наиболее широко распространенным из них является метод поверхностного пластического деформирования. Благодаря особенностям воздействия этот метод позволяет полнее реализовать потенциальные свойства, например, высокопрочных сталей. Этот вид упрочнения создает реальные возможности применения высокопрочных сталей для деталей с конструктивными и технологическими концентраторами напряжений даже при значительных перегрузках. Усталостная прочность высокопрочных сталей с мартенситной структурой при прочих равных условиях определяется совместным влиянием четырех основных характеристик материала – статической прочности, остаточных напряжений, сопротивления хрупкому разрушению и чувствительности к концентрации напряжений. Значение каждой из характеристик проявляется соответствующим образом в период зарождения и роста трещины. Если статическая прочность имеет первостепенное значение для сопротивления зарождению трещины, то сопротивление хрупкому разрушению играет решающую роль в сопротивляемости развитию трещины, а остаточные напряжения и чувствительность к концентрации напряжений реализуют свое влияние на обеих стадиях усталостного процесса. Учитывая

большое влияние на предел выносливости высокопрочной стали не только прочности, но и пластичности, важно оценить влияние этих параметров при упрочнении ППД.

При исследовании влияния ППД на усталостную прочность нормализованных и отожженных малоуглеродистых сталей низкой и средней прочности было установлено, что, независимо от того, достигнут уровень твердости изменением химического состава или термообработкой, большее повышение усталостной прочности в результате ППД наблюдается у более твердой стали. Обнаружено, что между степенью повышения предела выносливости после обкатки и прочностными свойствами стали в исходном состоянии нет однозначной зависимости. Наряду со статической прочностью значительное влияние на упрочняемость при ППД оказывают состав и структура стали. У сталей разного состава в закаленном и отпущенном состояниях абсолютные значения и относительный прирост предела выносливости после обкатки растут пропорционально прочностным свойствам только при сорбитной структуре. При трооститной и мартенситной структурах эта зависимость не наблюдается.

Для стали с мартенситной структурой при увеличении прочностных свойств отмечается даже тенденция к относительному уменьшению прироста предела выносливости после ППД.

При анализе эффективности ППД в зависимости от структурного состояния стали выявлена существенно большая упрочняемость мартенситной структуры по сравнению с сорбитной и трооститной, несмотря на меньшую способность к пластической деформации стали с мартенситной структурой. Степень упрочнения при обкатывании роликами, оцениваемая по относительному росту и абсолютным величинам предела выносливости, значительно выше при мартенситной, чем при сорбитной и трооститной структурах.

Следует отметить, что прирост предела выносливости достигается при выборе оптимальной нагрузки обкатывания для каждого уровня прочности и определенной структуры. В противном случае можно не достичь эффективных результатов. Особенно существенно влияние нагрузки обкатывания для стали с высоким содержанием углерода, но даже при пониженных нагрузках обкатывания ограниченная долговечность исследованных сталей во всех структурных состояниях после ППД резко возрастает.

Тип структуры в исходном состоянии определяет не только эффективность упрочнения при оптимальных режимах ППД, но и характер изменения предела выносливости в зависимости от степени пластической деформации (нагрузки обкатывания).

У сталей с сорбитной или трооститной структурой предел выносливости при сравнительно небольших нагрузках обкатывания достигает оптимального и затухает, в то время как при мартенситной структуре предел выносливости увеличивается в большом диапазоне изменения нагрузки обкатывания и стабилизируется лишь при высоких значениях нагрузки. Эта особенность наблюдается при двух видах напряженного состояния – изгибе и кручении.

Суть обработки методами ППД состоит в силовом контактном воздействии деформирующего инструмента на поверхность заготовки в условиях их относительного движения. Процесс ППД осуществляется без снятия стружки путем деформирования микронеровностей и глубинных, прилегающих к поверхности слоев материала. В результате происходит значительное снижение шероховатости, упрочнение поверхностного слоя, в нем возникают остаточные напряжения сжатия. При этом происходит интенсивное выглаживание поверхностных неровностей заготовки, сопровождающееся значительным упрочнением поверхностных слоев (повышением микротвердости и созданием благоприятных сжимающих напряжений); исключается шаржирование обработанной поверхности абразивными и другими частицами; становится возможным образование частично и полностью регулярных микрорельефов. Эти достоинства в сочетании с высокой производительностью, надежностью и простотой осуществления предопределили широкое и непрерывно расширяющееся применение различных способов финишной обработки давлением практически во всех отраслях промышленности с высокими технико-экономическими показателями.

Существенный вклад в становление процесса обработки ППД и его дальнейшее развитие внесли такие ученые, как Б.М. Аскинази, А.П. Бабичев, Я.И. Барац, Г.П. Башков, В.Ю. Блюменштейн, В.М. Браславский, Э.Г. Грановский, И.В. Кудрявцев, Л.Г. Одинцов, Д.Д. Папшев, В.В. Петросов, Ю.Г. Проскураков, В.М. Смелянский, В.М. Торбило, Л.А. Хворостухин, Г.И. Чекин, П.А. Чепя, Ю.Г. Шнейдер, П.И. Ящерицын, В.К. Яценко и др.

Вопросы ППД освещены также в работах зарубежных ученых И. Брудера, А. Зума, И. Нейкиррехена, Х. Конига, В. Прзибильского, И. Холла и др.

Исследования, приведенные в литературе, направляются главным образом на выявление общих и частных закономерностей ППД при большом разнообразии средств реализации этого вида обработки.

В зависимости от схемы силового воздействия деформирующего элемента на поверхность обрабатываемой детали в соответствии с ГОСТ 18296-72 можно выделить восемь основных групп процессов ППД (рис. 1).

Обобщенно способы обработки ППД принято разделять:

- на статические;
- динамические;
- комбинированные.

**К первой группе** относятся способы, при которых осуществляют непрерывное контактное взаимодействие инструмента с заготовкой в процессе их взаимного перемещения. Дополнительная классификация по различным аспектам процесса обработки приведена ниже (рис. 2).

Наибольшее распространение в крупносерийном и массовом производстве получили статические методы ППД, включающие дорнование, выглаживание и обкатывание, при которых осуществляют непрерывное контактное взаимодействие инструмента с заготовкой в процессе их взаимного перемещения. Статические методы ППД получили наиболее широкое распространение вследствие относительной простоты их реализации и стабильности протекания процесса обработки.

Выглаживание является одним из наиболее простых способов поверхностного пластического деформирования. Его отличает высокая производительность и стойкость инструмента. Выглаживанием достигается шероховатость  $Ra = 0,32-0,1$  мкм, при обработке возрастает микротвердость и в поверхностном слое создаются сжимающие остаточные напряжения. Процесс алмазного выглаживания кинематически аналогичен точению, только вместо резца применяется алмазный выглаживатель, который, пластически деформируя поверхностный слой, выравнивает и упрочняет его.



Рис. 1. Классификация способов поверхностного пластического деформирования



Рис. 2. Классификация способов упрочняющей обработки поверхностей деталей



Определенные представления о механизме упрочнения при ППД удалось получить Г.Е. Коджаспирову на базе рентгенографических исследований. Так, оценка ширины интерференционной линии  $\beta_{220}$  показывает, что величина  $\beta_{220}$  для сталей с мартенситной структурой (например, марок 45ХН2МФА, 18Х2Н4ВА) как в низкоотпущенном, так и в закаленном состоянии по всей глубине наклепанного слоя меньше, чем до деформации, причем изменение ее величины по сечению слоя характеризуется кривой с минимумом на некотором расстоянии от поверхности образцов. Можно полагать, что при ППД реализуются два процесса:

- 1) наклеп, приводящий к уширению линии за счет повышения плотности дефектов кристаллической решетки, причем этот процесс реализуется как при сорбитной, так и при мартенситной структуре;
- 2) процесс разупорядочения структуры, связанный с явлениями перераспределения атомов углерода в решетке мартенсита и приводящий к уменьшению величины физического уширения (имеет место, соответственно, только в случае мартенситной структуры).

Поскольку суммарный эффект выражается, как правило, в уменьшении ширины линии, очевидно, что преобладающим является второй процесс.

Соотношение интенсивности этих процессов определяет экстремальный характер кривой изменения ширины интерференционных линий по глубине упрочненного слоя. Положение минимума на ней соответствует определенной «критической» степени деформации (реализующейся для каждой нагрузки обкатывания на определенном расстоянии от поверхности), т. е. той наименьшей степени пластической деформации, при которой наиболее полно осуществляется процесс разупрочнения структуры, а влияние наклепа относительно невелико.

В последнее время экспериментально показано, что упрочнение ППД является средством понижения скорости роста трещин. Остаточные сжимающие напряжения обуславливают более медленный рост усталостной трещины как по периметру, так и по глубине упрочненного слоя.

Поверхностное пластическое деформирование резко устраняет отставание роста  $\sigma_{-1}$  от уровня прочностных свойств, наблюдаемое у ста-

лей с мартенситной структурой. В результате этого коэффициент выносливости  $K_B = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_B}$  сталей с мартенситной структурой значительно повышается (от 0,32–0,38 в неупрочненном состоянии до 0,43–0,58 после ППД), т. е. ППД позволяет более полно использовать потенциальные свойства высокопрочных сталей.

Эффективность ППД, как было показано выше, в значительной степени определяется структурой стали. Большее повышение  $\sigma_{-1}$  у сталей с мартенситной структурой в результате ППД частично обусловлено более высоким уровнем остаточных сжимающих напряжений и большим повышением прочностных свойств поверхностного слоя. Однако зависимость усталостной прочности от остаточных напряжений и приращения твердости поверхности не наблюдается.

ППД высокопрочных мартенситных сталей существенно (в 2–3 раза) повышает работу развития трещины и тем самым в определенной мере компенсирует отрицательное влияние на усталостную прочность низкого сопротивления хрупкому разрушению, присущего этим материалам.

По Г.Е. Коджаспирову, с повышением содержания углерода у сталей с мартенситной структурой рост предела выносливости после ППД замедляется, несмотря на то что при этом сжимающие напряжения и приращение твердости поверхностного слоя увеличиваются. Следствием этого является сохранение и после ППД различия в коэффициенте выносливости мартенсита с разным количеством углерода ( $K_B = 0,58$  при 0,15% и  $K_B = 0,43$  при 0,47% С).

Из всех подобных материалов наибольший рост усталостной прочности после ППД достигается у низкоуглеродистого мартенсита, хотя для этого структурного состояния характерны остаточные напряжения средней величины и небольшое приращение твердости поверхности. Высокая эффективность ППД в этом случае объясняется рядом факторов: 1) особенностями кинетики усталостного разрушения; 2) большой сопротивляемостью развитию трещины, присущей этому материалу (при достаточно высоком уровне прочностных свойств); 3) специфической механизма упрочняемости мартенситной структуры.

По данным М.А. Балтер, фактографические исследования усталостных изломов позволили установить, что преимущества, обусловленные

кинетикой разрушения, для низкоуглеродистого мартенсита связаны с тем, что у этого материала усталостная трещина в основном распространяется в упрочненном слое. Процесс в начальной стадии развивается в условиях изоляции от внешней среды, очаг разрушения зарождается под поверхностью, в зоне меньших рабочих напряжений, при этом ослабляется действие поверхностных концентраторов напряжений, что в результате определяет существенное повышение долговечности.

У высокопрочных сталей с мартенситной структурой рост усталостной трещины происходит под деформированным слоем в неупрочненном материале, который отличается низким сопротивлением хрупкому разрушению. Поэтому для таких материалов после ППД сохраняется большое значение пониженной вязкости разрушения и, как следствие,  $K_{Ic}$  меньше, чем у низкоуглеродистой стали мартенситной структуры.

У стали с сорбитной структурой зарождение трещин облегчается в связи с наличием глубоких надрывов, образовавшихся на поверхности после обкатывания, а развитие усталостных трещин происходит в деформированном слое, который отличается меньшей степенью упрочнения, чем при мартенситной структуре. Все это объясняет относительно пониженную эффективность ППД сорбитной структуры стали.

ППД в определенной степени нейтрализует резко отрицательное влияние на усталостную прочность мартенситной стали структурных дефектов поверхности (обезуглероживание, шлифовочные прижоги), однако полностью не устраняет. Дефекты поверхности ослабляют влияние ППД, так как не позволяют применять оптимальную для данной структуры степень деформации, не вызывая шелушения, т. е. не удается в полной мере реализовать все возможные резервы упрочнения ППД. Кроме того, когда поверхность ослаблена, развитие поверхностных усталостных трещин опережает распространение фронта разрушения от глубинного очага и ускоряет излом.

Имеются данные исследований университета «Gh. Fsaïi» по упрочнению поверхности методом выглаживания роликом. Эксперименты показали, что в диапазоне подач  $s = 0,1-0,2$  мм/об,  $v = 10-15$  м/мин и силе прижима ролика  $P = 900-1200$  Н шероховатость выглаженной поверхности достигает значений  $Ra = 0,1-0,2$  мкм.

Дорнование является эффективным способом отделочно-упрочняющей обработки отверстий, широко применяемым в промышленности.

В работе Ю.Г. Проскурякова показано, что при дорновании повышается прочность прессовых посадок и долговечность деталей, имеющих концентраторы напряжений в виде поперечных отверстий. Результаты опытов показали, что при дорновании отверстия цилиндра из стали 45 его несущая способность может быть повышена до 2,5 раза. Точность после дорнования возрастает до 6–9 качества, а шероховатость снижается от  $Rz = 40–6,3$  мкм исходной до  $Rz = 3,2–0,8$  мкм после дорнования, а в отдельных случаях до  $Rz = 0,8–0,2$  мкм.

Одним из статических методов обработки ППД, обеспечивающих повышение качества поверхности деталей машин и долговечности изделия при одновременном увеличении производительности труда, является метод бесцентрового отделочно-упрочняющего обкатывания напроход. Установлено, что в результате обработки разноразмерность уменьшается с 18 мкм исходной до 6 мкм после обкатывания, происходит существенное исправление погрешностей геометрической формы в поперечном сечении.

Как показывают некоторые публикации В.М. Торбило и Ю.Г. Проскурякова, выглаживанием обрабатываются не только стали, но и цветные металлы, и чугуны с неизменным увеличением износостойкости и прочности.

В настоящее время для повышения качества поверхности применяется способ обработки упрочняющим диском.

Имеются данные экспериментальных исследований по восстановлению размеров наружных диаметров на образцах из сталей 1Х17Н2, 2Х18Н9, 3Х13 методом ППД. Его особенность заключается в том, что из трех рабочих роликов два гладкие и один — с кольцевыми канавками специального профиля с шагом 0,15 мм. Профилированный ролик выдавливает материал, гладкие же обжимают его, обуславливая контактную поверхность не менее 2/3 номинальной. При этом в зависимости от профиля канавки и нажимного усилия можно стабильно поднять диаметр от 1 до 10 мкм. Испытания показали, что восстановленные цилиндрические сопряжения сопротивляются повторным нагрузкам лучше, чем, например, притертые, на 10–20%.

Для реализации процесса выглаживания в крупносерийном и массовом производстве, а именно при большой годовой программе выпуска деталей, эффект от обработки без СОТС становится наибольшим,

помимо получения качества становится актуальным повышение производительности процесса. Существуют несколько направлений повышения производительности статических методов ППД (рис. 3).

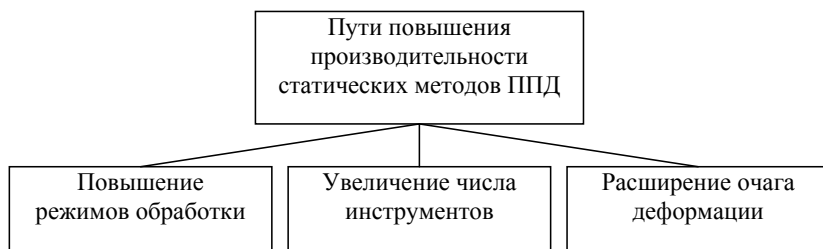


Рис. 3. Пути повышения производительности статических методов ППД

Рассмотрим их подробнее. Производительность алмазного выглаживания существенно зависит от режимов обработки – подачи и скорости.

Поэтому эти режимы необходимо выбирать возможно большими в пределах, обеспечивающих требуемое качество поверхности.

Для увеличения скорости обработки необходимо снизить температуру в зоне контакта инструмента и заготовки. Одним из путей снижения температуры выглаживания является интенсификация теплоотвода из зоны контакта алмаза с деталью за счет теплопроводности, конвекции и излучения. Чем интенсивнее теплоотвод, тем быстрее после начала обработки в системе «выглаживатель – деталь» установится квазистационарный температурный режим и тем меньшее количество теплоты, определяющее температуру выглаживания, аккумулируется в контактной зоне. Для интенсификации теплоотдачи можно использовать различные способы охлаждения, изготавливать корпус выглаживателя из более теплопроводных материалов, увеличивать площадь его теплоотдающей поверхности, а также обеспечивать оптимальное по размерам и форме сочетание конструктивных элементов. Повышение производительности обработки путем увеличения скорости выглаживания достигается при охлаждении инструмента с помощью радиатора-насадки. Применение радиатора позволяет снизить контактную температуру на 30–45% и увеличить скорость выглаживания в 2–2,7 раза. Вопросы уменьшения тем-

пературы самого инструмента и зоны контакта его с заготовкой рассмотрены в работах В.В. Петросова, В.М. Торбило, Е.А. Евсина и др.

Имеются данные о повышении эффективности процесса выглаживания сталей замораживанием образцов. Замораживание перед обработкой до температуры  $-70^{\circ}\text{C}$  позволяет увеличить силу выглаживания, исключив возможность перенаклепа и улучшив распределение напряжений в поверхностном слое. Существуют исследования по обработке ППД в условиях глубокого холода, такие как выглаживание в среде жидкого азота, выглаживание в криогенных парах азота и выглаживание в среде атмосферного воздуха заготовок, предварительно охлажденных до азотных температур. При выборе сравниваемых показателей процесса трения учитывалась не только их способность отражать особенности каждого отдельного варианта, но и низкотемпературной обработки в целом. В качестве критериев были приняты  $f_{\text{тр}}$  – коэффициент трения, критерий упругого оттеснения, критерий перехода к микрорезанию. Был предусмотрен одинаковый уровень охлаждения заготовок ( $-190^{\circ}\text{C}$ ). Выяснилось, что минимальные значения  $f_{\text{тр}}$  и  $f_{\text{н}}$  обеспечиваются при выглаживании в среде атмосферного воздуха заготовок, предварительно охлажденных до криогенных температур. Этот же способ обработки является эффективным для упрочнения деталей из аустенитных нержавеющей сталей, при котором формируется особый микрорельеф из-за конденсации влаги воздуха на поверхности обработанной детали.

В последнее время исследователей интересуют вопросы, связанные с наплывом металла при ППД. Срезание наплыва металла перед инструментом увеличивает скорость перемещения его по поверхности заготовки. В некоторых работах наплыв рассматривается как отрицательное явление, влияющее на искажение профиля изделия, в других предлагается использовать наплыв для расширения технологических возможностей процесса ППД.

Методы совмещения процессов резания и ППД позволяют обеспечить повышение производительности и точности обработки. П.С. Чистосердовым предложены следующие способы управления точностью совмещенной обработки: а) изменение величины усилия деформирования; б) изменение направления действия этого усилия; в) одновременное изменение величины и направления деформирующей силы.

При одновременной обработке двумя разнорациусными инструментами улучшаются условия пластической деформации. В результате повышаются качество изделий и производительность процесса. Одновременная обработка двумя и более инструментами, установленными в плоскости, перпендикулярной оси вращения заготовки, позволяет увеличить подачу пропорционально числу инструментов. Имеются сведения об улучшении качества поверхностей изделий при обработке двумя и более инструментами, расположенными в приспособлении таким образом, что один из них, двигаясь по поверхности детали, опережает другие. Одним из направлений увеличения производительности обработки является выглаживание многоэлементными алмазными инструментами. Результаты опытов показывают увеличение микротвердости поверхностного слоя при данной обработке в 1,5 раза и уменьшение высоты неровностей в 2,5–3 раза. Для данной обработки применяется специальный инструмент. На рабочих поверхностях инструмента расположено большое количество сверхтвердых выглаживающих элементов, значительная часть которых в процессе работы контактирует с обрабатываемой поверхностью детали и осуществляет выглаживание.

Одним из направлений увеличения производительности обработки является выглаживание многоэлементными алмазными инструментами. Результаты опытов показывают увеличение микротвердости поверхностного слоя при данной обработке в 1,5 раза и уменьшение высоты неровностей в 2,5–3 раза. Для данной обработки применяется специальный инструмент. На рабочих поверхностях инструмента расположено большое количество сверхтвердых выглаживающих элементов, значительная часть которых в процессе работы контактирует с обрабатываемой поверхностью детали и осуществляет выглаживание.

Как уже говорилось, одним из направлений служит расширение очага деформации в направлении, перпендикулярном его перемещению.

Обработка дорнованием (деформирующим протягиванием, калиброванием) осуществляется путем перемещения с натягом деформирующего инструмента (дорна) вдоль оси отверстия заготовки. В отличие от других методов ППД дорнование характеризуется значительными возможностями формообразования. К недостаткам дорнования относится то, что для перемещения инструмента требуются большие силы, вызывающие необходимость использования специального оборудова-

ния. Существует обработка ротационным протягиванием отверстий, производительность которой по машинному времени в 30–50 раз выше производительности шариковых и в 5–10 раз – роликовых ротационных дорнов. Ротационное протягивание отверстий, сопровождающееся ППД слоя материала обрабатываемой детали, изменяет не только микрогеометрию ее поверхности и размеры, но и приводит к увеличению твердости поверхностного слоя, появлению остаточных напряжений в стенках детали и др.

Разработка новых инструментов и развитие методов ППД, применение инденторов, образующих пятно контакта, вытянутое в направлении вектора скорости, в работах В.М. Торбило обусловлены стремлением наиболее полного использования деформирующей поверхности инструмента и повышения его стойкости. Форма деформирующей поверхности инструмента оказывает существенное влияние на режимы и параметры качества обработки. Наиболее распространенной формой поверхности выглаживающего и обкатного инструмента является сфера. Увеличение подачи при использовании сферического инструмента достигается путем увеличения радиуса сферы. Однако при этом пропорционально квадрату радиуса растет сила, прикладываемая к инструменту.

Имеются исследования по повышению производительности за счет увеличения подачи, для чего нужно соответственно увеличить радиус выглаживателя  $R$  и силу  $P$ . При этом необходимо сохранить постоянное значение параметров  $P$  – контактного давления,  $N$  – цикличности нагружения. Были проведены эксперименты на образцах из закаленных сталей 40Х, ШХ15, предварительно шлифованных по  $Ra = 1,25$  мкм. Результаты показали, что существенного различия между качеством поверхности после обычного и силового выглаживания нет. Особенностью шероховатости после силового выглаживания является увеличенный шаг микронеровностей обработанной поверхности, вызванный увеличением подачи. Качество поверхности практически одинаково, а подача и производительность обработки при силовом выглаживании в 1,5–2 раза больше. Ограничением к применению силового выглаживания служит жесткость обрабатываемой детали.

Стремление увеличить подачу без увеличения силы прижатия привело к созданию инструментов, образующих вытянутое в направлении подачи пятно контакта с заготовкой. Среди выглаживающих инстру-



ментов такую форму имеет тор, ось которого размещена перпендикулярно оси державки инструмента.

Установка цилиндрического выглаживающего инструмента под углом к оси заготовки позволяет получить эллиптический отпечаток, что ведет к существенному увеличению подачи. Недостатком указанного способа является то, что длина пятна контакта и сила, прикладываемая к инструменту, в значительной мере зависят от диаметра заготовки. При уменьшении угла  $\gamma$  между осью инструмента и осью заготовки возрастает вероятность выхода кромки основания цилиндра инструмента в зону контакта с заготовкой, что приводит к резанию и ухудшению качества поверхности.

Этого можно избежать, используя индентор с рабочей частью, образованной тремя цилиндрическими поверхностями. Ось цилиндра такого инструмента может быть установлена параллельно оси заготовки.

Имеются работы, в которых приведены исследования данного метода обработки. Эксперименты показали, что при циклах нагружения  $N = 1-5$  мм/об,  $v = 5-15$  м/мин и силе прижима выглаживателей  $P = 4000-10000$  Н шероховатость выглаженной поверхности достигает значений  $R_a = 0,2-0,4$  мкм при исходной шероховатости, полученной после шлифования,  $R_a = 0,8-1,2$  мкм, что обуславливает эффективность данного метода обработки.

**Ко второй группе** относятся способы обработки, при которых взаимодействие инструмента с заготовкой носит дискретный, ударный характер. Это дробеструйное упрочнение, центробежная обработка шариками и щетками, вибрационная обработка в среде свободных деформирующих элементов, описанные в работах А.П. Бабичева, В.В. Петросова, Л.А. Хворостухина и др.

Примером динамической обработки ППД может служить обработка поверхности механическими щетками. Этот метод ППД обеспечивает повышение работоспособности деталей машин и сварных конструкций. В результате обработки секционными щетками шероховатость поверхности снижается в 1,3–2 раза. Поверхностная твердость возрастает на 10–20% при толщине упрочненного слоя 0,09–1,2 мм.

Метод алмазного вибронакатывания тоже относится ко второй группе. Приведены результаты исследований обработки внутренних поверхностей закаленных сталей. Исходные неровности снижаются на 2–3 клас-

са, а высоту шероховатости при вибронакатывании можно регулировать, изменяя силовые и кинематические параметры обработки.

Обработка дробью – наиболее эффективный, распространенный, а в некоторых случаях незаменимый технологический метод повышения несущей способности изделий ППД. Работы в этой области проводил В.В. Петросов. Главными преимуществами метода являются высокая технологичность и универсальность, обеспечивающие возможность обработки любых сложнофасонных поверхностей без точного базирования и применения дорогостоящего оборудования. Например, гидродробеструйная обработка рабочей поверхности штампов приводит к повышению износостойкости штампов в 2 раза, улучшает микрогеометрию обрабатываемых поверхностей и создает остаточные напряжения сжатия.

Перспективным методом обработки для повышения надежности и ресурса работы является обработка микрошариками (ОМШ). Усталостные испытания, проведенные на специальных профильных образцах из сплава, показали, что ОМШ повышает предел выносливости на 8% и на поверхности образуется микрорельеф с шероховатостью  $Ra = 0,6–1,2$  мкм.

Некоторые присущие традиционному выглаживанию недостатки позволяет преодолеть метод силового виброударного выглаживания. Предлагаемый метод позволяет увеличить производительность обработки путем увеличения осевой подачи до 1 мм/об, создается возможность получить не только низкую шероховатость поверхности, но и увеличить глубину и степень упрочнения по сравнению с обычным выглаживанием.

В настоящее время производятся дальнейшие исследования по повышению производительности обработки в результате внедрения многоконтактного силового виброударного выглаживания.

**Комбинированные способы обработки** включают такие, при которых наряду с поверхностным пластическим деформированием имеет место иное физико-механическое воздействие на заготовку, например, лазером, наложением ультразвуковых колебаний, пропусканием электрического тока через место контакта инструмента с заготовкой, предварительным нагревом или охлаждением заготовки и др. К комбинированным способам обработки относятся также методы ППД, совмещенные с процессами резания.

Примерами комбинированного способа обработки могут служить следующие методы.

В работах В.М. Смелянского представлен способ размерно-совмещенного обкатывания (PCO), при котором резцом срезают наплыв материала, образуемый перед деформирующим инструментом в направлении подачи. Достоинство PCO состоит в том, что функции размерообразования изделия в значительной мере переданы от резца к ролику, благодаря чему снижается влияние износа резца на точность обработки. При этом натяг может достигать 1 мм на ролик без разрушения поверхности материала.

Существуют предложения совместить процесс ППД с обработкой резанием, например на многоцелевом станке. Это позволит расширить применение методов ППД при обработке отверстий в корпусных деталях, повысить их точность и качество поверхностного слоя.

Есть способ нанесения рельефа резцом с последующим частичным сглаживанием его деформирующим инструментом. Указывается, что при таком способе обработки исключается образование наплывов.

В работе Б.М. Аскинази рассмотрен электромеханический способ упрочнения поверхностей, отличительными чертами которого являются мелкодисперсная и твердая структура поверхностного слоя, обладающего высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами. 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.

Отдельное научное направление представляет применение ультразвуковых колебаний, передаваемых инструменту. При прочих равных условиях удается снизить прикладываемую к инструменту силу в 2,5–3 раза.

Исследования, проведенные в лабораториях физико-технического института АН БССР, МАИ, КуАИ и др., показали, что под действием ультразвуковых колебаний механические свойства металла значительно изменяются. Это позволяет использовать ультразвук для интенсификации пластических деформаций поверхности металла, что

открывает новые возможности упрочняющей технологии, особенно для нежестких деталей, изготовленных даже из высокопрочных материалов. Исследования, проведенные в данной работе, показывают, что при ультразвуковом упрочнении наряду с формированием благоприятных сжимающих остаточных напряжений имеет место значительное (на 2–5 классов) повышение чистоты обрабатываемой поверхности. Обработанные этим способом образцы выдерживают в 4–5 раз больше циклов нагружения до разрушения по сравнению со шлифованными.

Предлагается один из методов повышения ресурса работы подшипников ультразвуковым упрочнением (УЗУ) несвязанными шариками. Как известно из анализа результатов исследования, при УЗУ поверхностный слой упрочняется на глубину 100 мкм. Значение твердости на 7% выше подсчитанной по зависимостям. УЗУ увеличивает контактную выносливость колец подшипника на 35–40% и является большим резервом повышения долговечности изделий.

Ультразвуковые колебания применяются также при деформирующем протягивании, что позволяет снизить силы трения за счет изменения кинематики скольжения инструмента, увеличить качественные характеристики обработанной поверхности. Было установлено также, что ультразвуковое упрочнение оказывает существенное влияние на напряженно-деформированное и энергетическое состояние поверхностного слоя, причем максимальные значения интенсивности деформации и энергетического возбуждения находятся на некотором расстоянии от поверхности.

В существующих работах предлагается использовать одновременное воздействие лучом лазера и ультразвуковым инструментом (ЛУЗО) и комбинированное (Л+УЗО) воздействие. При воздействии ЛУЗО и Л+УЗО микротвердость поверхностного слоя стальных деталей увеличивается в 4–5 раз, шероховатость поверхности изменяется от  $Ra = 0,63$  мкм до  $Ra = 0,25$  мкм, в поверхностном слое создаются остаточные микронапряжения сжатия.

Предложен новый, перспективный метод комбинированной обработки – упрочнение обкатыванием шариком в сочетании с лазерной обработкой. Последующая лазерная обработка дает возможность дополнительно повышать твердость предварительно упрочненной методами ППД поверхности в значительных пределах.

К числу перспективных методов комбинированной обработки следует отнести деформирующе-легирующую обработку с введением в зону контакта инструмента с деталью электрического тока.

Результаты экспериментальной оценки предлагаемых методов модификации для повышения технологической и эксплуатационной антифрикционности титановых сплавов показали, что все методы – газонасыщение поверхности (ГН), химико-термическая обработка (ХТО) в расплавах карбонатных солей щелочных металлов, импульсное анодирование поверхности (ИА) в кислотных растворах, электроискровое легирование поверхности (ЭИЛ) твердыми износостойкими металлами – имеют свои достоинства. Например, эффективность метода ИА +ППД характеризуется повышением микротвердости, шероховатости ( $Ra = 0,035-0,06$  мкм). Также при увеличении рабочей температуры коэффициент трения деталей, обработанных ЭИЛ + выглаживание, в 1,5–2 раза меньше, чем для деталей после ХТО + выглаживание.

Теоретически и экспериментально доказана возможность обеспечения высоких физико-механических и геометрических характеристик качества поверхностного слоя посредством нанесения твердосплавных покрытий с последующим импульсным пластическим деформированием. Шероховатость поверхности до  $Ra = 0,4$  мкм, износостойкость на 10–50% выше спеченных твердых сплавов, микротвердость достигает 14260 МПа.

### **Контрольные вопросы**

1. Перечислите основные направления развития технологии машиностроения.
2. Какие физические процессы происходят при обработке ППД?
3. Чем определяется эффективность ППД?
4. Каковы способы повышения производительности статических методов ППД?
5. Каковы преимущества комбинированных способов обработки?

## 2. ВЛИЯНИЕ МЕТОДОВ ППД НА ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ

Долговечность и надежность машин и конструкций определяются эксплуатационными характеристиками наиболее нагруженных деталей.

Известно, что на долговечность деталей машин влияют множество факторов, таких как износостойкость, поверхностная прочность, макрогеометрия, микронеровности поверхности и др.

Однако независимо от вида нагружений наибольшие нагрузки испытывают поверхностные слои деталей, наиболее интенсивно подвергающиеся воздействию внешней среды. Эксплуатационные характеристики поверхностных слоев определяются в основном технологией их обработки. Поверхностно-пластическое деформирование является наиболее выигрышным методом упрочнения поверхностных слоев деталей машин.

При проведении исследований в работе Л.Г. Одинцова оказалось, что после 43000 км пробега износ поршневых пальцев, обработанных алмазным выглаживанием, был на 60–93% меньше необработанных образцов.

Я.И. Барацем предложено применить ППД с нанесением регулярного микрорельефа с целью повышения эксплуатационных свойств трущейся пары поршень – корпус. При опытно-промышленной проверке процесса проводились исследования влияния параметров и режимов обработки на герметичность сопряжения, прирабатываемость и износостойкость контактируемых поверхностей. В свою очередь, Ю.Г. Шнейдером было установлено, что наиболее рациональным регулярным микрорельефом для данной детали является частичный РМР с соприкасающимися канавками.

В работе В.А. Горохова приводится исследование износа и прирабатываемости образцов из технического титана ВТ1-1 после обработки их виброобкатыванием, обкатыванием, точением и шлифованием. Результаты исследования показали, что на поверхностях, обработанных ППД, износ приработки меньше в 2 раза. Таким образом, можно считать, что повышение износостойкости титановых сплавов увеличивается на 55% вследствие оптимизации геометрических и на 45% вследствие оптимизации физических параметров обрабатываемых методами ППД поверхностей.

Большое место среди деталей, работающих на трение, занимают резинометаллические пары, среди них наиболее характерными явля-

ются шейки валов, контактирующие с манжетными уплотнениями. Для оценки износостойкости при различных методах обработки металлических поверхностей (шлифование, полирование, алмазное выглаживание) произведено испытание образцов из стали 40Х на машине трения. Результаты показали, что поверхности, обработанные алмазным выглаживанием, в 1,5–2 раза меньше изнашиваются, чем после полирования, и в 5 раз меньше, чем после шлифовальной обработки.

Повышение долговечности опор буровых долот и резбовых соединений бурильных труб достигается применением деформационно-электрохимической обработки поверхностей трения, совмещающей осаждение твердосмазочного композиционного электрохимического покрытия с ППД наносимого слоя. При обработке микротвердость повышается в 1,5–2 раза, уменьшается интенсивность изнашивания на 33–53%, увеличивается контактная выносливость на 54%. Существуют иные способы повышения долговечности пар трения. Суть процесса заключается в нанесении антифрикционного композита (методом фрикционного переноса) на предварительно обработанную, с заданным микрорельефом поверхность. Термостойкость такого покрытия сохраняется до температуры 870 К. Исследования на износостойкость в работе Я.И. Бараца на образцах из сталей 40, 20Х, 40Х, 12ХН3А, 38ХН3МА показали, что оптимальными вариантами стали отделочно-упрочняющая обработка закаленного вала методом обкатки шариком, для втулки – растачивание с последующей обработкой ППД роликовой раскаткой (или растачивание с последующим образованием РМР). Д.Д. Папшевым были проанализированы полученные положительные результаты по повышению износостойкости при обработке шариком, ультразвуковым упрочнением и вращающимися механическими щетками с оптимальными режимами и соответствующими условиями на закаленных, легированных сталях и титановых сплавах. При упрочнении щетками титановых сплавов, например сплава ПТЗВ ( $\sigma_b = 650–900$  Мпа), прирост твердости составляет 15–30% при толщине упрочненного слоя 0,1–0,3 мм. Исследования Ю.И. Кургузова показали, что обработка щетками приводит к снижению в 1,2–1,4 раза среднего арифметического отклонения микропрофиля шлифованных поверхностей. Микротвердость поверхности исследованных закаленных сталей возрастает на 10–30%. Снижается износ на 30–40% по сравнению со шлифованными поверхностями, при этом в 1,5–2,2 раза уменьшается время приработки, что благоприятно отража-

ется на увеличении износостойкости. В работе М.К. Александрова проведенные исследования показали, что ультразвуковое упрочнение повышает предел выносливости деталей из титановых сплавов ОТ4 и ВТ9 на 40–48% по сравнению со шлифованием. После ультразвуковой обработки заметно улучшается и шероховатость обработанной поверхности по сравнению с исходной. Повышение долговечности и выносливости изделий достигается созданием оптимальных полей остаточных напряжений в теле деталей. Одним из таких методов является метод термомеханического упрочнения. Задача создания полей остаточных напряжений решается в два этапа: сначала определяется температурное поле, а затем рассчитываются остаточные напряжения и пластические деформации. В ЦНИИТмаше была исследована усталостная прочность крупных валов и ступенчатых валов, изготовленных из сталей 40Х, 40ХН, 40. По результатам испытаний видно, что наклеп привел к значительному увеличению усталостной прочности. В Санкт-Петербургском инженерно-экономическом институте были проведены исследования качества поверхностного слоя на усталостную прочность предварительно обработанных точением образцов из титанового сплава ВК3-1, подвергнутых пластической деформации обкатыванием. При обработке шариками с увеличением усилия усталостная прочность увеличивается. При обкатке роликами с усилием 50 и 100 кг она составляет 50–51 кг/мм, а с увеличением усилия до 150–200 кг снижается до 35–40 кг/мм. Исследованием микроструктуры обкатанных образцов установлено, что в результате пластической деформации в поверхностном слое возникает значительная неоднородность структуры, которая влияет на усталостную прочность.

Вибрационная обработка создает предпосылки для повышения долговечности деталей машин. Это связано с особым строением микрорельефа поверхности и физико-механическими свойствами поверхностных слоев материала. Исследование качества поверхности после обработки виброгалтовкой (в работе А.П. Бабичева) позволило вскрыть некоторые из этих возможностей. Виброгалтовку проводили на образцах из стали ШХ15 в отожженном и закаленном состоянии с использованием рабочей среды ЭБ40СТ1К. В результате обработки в первый период происходит резкое уменьшение шероховатости поверхности деталей. После такой обработки создается микрорельеф поверхности, отличающийся отсутствием направленных следов обработки. При этом шероховатость поверхности как по форме, так и по величине



почти равнозначна во всех направлениях. Другими свойствами полученной поверхности являются ее повышенная активность и адгезия, что позволяет в процессе виброгалтовки наносить износостойкие покрытия – пленки дисульфида молибдена, фосфатные и др. В результате упрочнения поверхностного слоя и улучшения формы микрорельефа после всех способов дробеструйной обработки снижается интенсивность изнашивания деталей машин.

Установлено, что после обработки в дробеметной установке деталей из высокопрочного чугуна твердость поверхности увеличилась на 36%, предел выносливости – на 15% при глубине упрочнения 0,6 мм. Способы дробеметного упрочнения (ДМУ) и гидродинамического упрочнения (ГДУ) существенно влияют на повышение малоциклового ударной усталостной прочности высокопрочной закаленной стали 35ХН2МФА-Ш и ее долговечность. Предел выносливости образцов из различных сталей и цветных сплавов, упрочненных методом ГДУ, повышается на 20–90%, а долговечность – на 450–900%.

Повышение качества поверхностного слоя материала обеспечивается за счет комбинированного статико-импульсного приложения нагрузки к деформирующему инструменту. Предударное статическое нагружение создает благоприятные условия для более полной передачи энергии ударного импульса материалу детали. Импульсная передача энергии в зону локального контактного взаимодействия детали и инструмента позволяет интенсифицировать процесс ППД, приводит к углублению активной зоны. Шероховатость поверхности при обработке приближена к шероховатости поверхности при статическом ППД.

Эффективно также сочетание высокотемпературной термической обработки с поверхностно-пластическим деформированием. Исследовалось влияние обкатки роликами на упрочнение поверхности образцов стали 60С2А после обычной закалки и ВТМО. Наблюдались большие упрочнения обрабатываемой стали. Повышенный запас пластичности после ВТМО позволяет проводить более интенсивное упрочнение без снижения поверхностной микротвердости.

### **Контрольные вопросы**

1. Как и в какой степени ППД влияет на долговечность деталей?
2. Как изменяется усталостная прочность после обработки ППД?

### 3. ФЕНОМЕНОЛОГИЯ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Металл, как и любой кристаллический материал, подвержен наклепу. Термин «наклеп» (или деформационное упрочнение) означает, что если кристаллический образец уже подвергался пластической деформации, то для дальнейшей его пластической деформации необходимо напряжение, которое превышает напряжение, вызвавшее первоначальную пластическую деформацию. Деформационное упрочнение происходит лишь в том случае, если температура деформации низка по сравнению с температурой плавления материала. Металл, деформированный при низкой температуре, называют холоднодеформированным. Термины «наклеп», «холодная деформация» и «горячая деформация» (последний термин означает деформацию при достаточно высоких температурах, позволяющих избежать деформационного упрочнения) давно применяются в металлообрабатывающей промышленности и обычно используются исследователями, работающими в области изучения пластической деформации.

Кривая напряжение – деформация (рис. 4) (или кривая деформации) для какого-либо металла позволяет дать количественную оценку склонности металла к деформационному упрочнению. Эта кривая представляет зависимость между напряжением, приложенным к образцу, и деформацией, вызванной этим напряжением. При отсутствии особых оговорок предполагается, что до деформации образец был отожжен в течение некоторого времени при температуре немного ниже температуры плавления. Высокотемпературный отжиг устраняет всякое деформационное упрочнение, которое могло возникнуть в процессе изготовления металлического образца.

Пластические деформации могут быть весьма значительными. Простые выражения, используемые для описания малых деформаций, рассматриваемых в линейной теории упругости, не применимы в случае значительных деформаций. Например, деформация  $\epsilon$  образца, длина которого при растяжении изменилась от  $L_0$  до  $L$ , равна известному отношению  $(L - L_0)/L$  только в том случае, если это отношение мало по сравнению с единицей. Выражение, которое справедливо при значительных деформациях, можно получить следующим образом. Приращение деформации  $\delta\epsilon$ , возникающее при изменении длины образца

от  $L$  до  $L + \delta L$ , равно  $\delta\varepsilon = \delta L/L$ . Общая деформация образца, который удлинился от начальной длины  $L_0$  до конечной длины  $L$ , будет

$$\varepsilon = \int_0^\varepsilon d\varepsilon = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln \frac{L}{L_0}. \quad (1)$$

Это выражение приводится к более известному выражению, когда  $L$  почти равно  $L_0$ . Выражение (1) справедливо как для одноосного растяжения, так и для одноосного сжатия, что очень важно для рассматриваемого случая упрочнения выглаживанием.

На рис. 4 схематически показана кривая напряжение – деформация, типичная для поликристаллических металлов с ГЦК-решеткой (гранецентрированной кристаллической решеткой, например, у меди, алюминия и никеля) или ГПУ-решеткой (гексагональной плотно-упакованной решеткой, например, у титана и цинка) при растяжении до значительных деформаций. С увеличением деформации наклон кривой уменьшается. Таким образом, для поликристаллических металлов степень деформационного упрочнения, которая определяется наклоном кривой деформации, уменьшается с увеличением деформации.

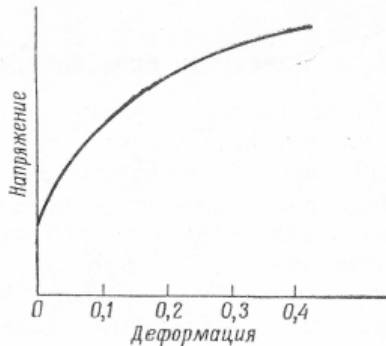


Рис. 4. Схематическое изображение кривой напряжение – деформация для поликристаллических металлов с ГЦК- или ГПУ-решеткой

Применительно к деформации сталей, имеющих ОЦК (объемно-центрированную кубическую) кристаллическую решетку, приведены примеры кривых упрочнения при сжатии стали 40 после отжига (рис. 5), нормализации и улучшения и обожженной инструментальной стали У7.

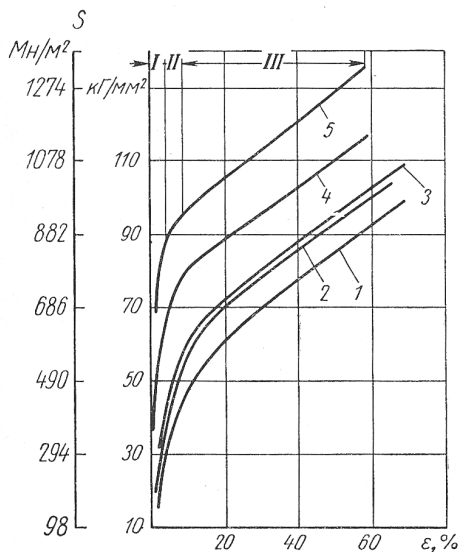


Рис. 5. Кривые упрочнения при сжатии термически обработанных сталей:  
 1 – сталь 40 после отжига; 2 – сталь У7 после отжига;  
 3 – сталь 40 после нормализации; 4 – сталь 40 после улучшения ( $t_{\text{отп}} = 600^\circ \text{C}$ );  
 5 – сталь 40 после улучшения ( $t_{\text{отп}} = 500^\circ \text{C}$ )

Кривая напряжение – деформация металла обычно обрывается при некоторой конечной деформации вследствие разрушения образца. Причина разрушения может быть различной для разных образцов и металлов и, кроме того, зависит от вида нагружения. В результате деформационного упрочнения напряжения, необходимые для дальнейшей деформации, могут возрасти до столь высоких значений, что в металле возникают трещины, которые распространяются через образец. При испытаниях на растяжение пластичных металлов разрушение происходит в результате образования в каком-либо месте образца шейки с малой площадью поперечного сечения. Если площадь поперечного сечения в каком-нибудь месте образца станет меньше средней, то напряжения в этом месте должны быть больше, чем средние напряжения. Такое увеличение напряжений может привести к увеличению деформации в месте с меньшим поперечным сечением и, таким образом, вызвать еще большее сужение поперечного сечения. Этот процесс может развиваться катастрофически и привести к разрушению.

Кривая деформации для поликристаллического материала представляет в некотором роде усредненную кривую зависимостей напряжение – деформация для отдельных зерен. Однако при деформации поликристалла отдельные зерна деформируются неодинаково. Следовательно, кривая деформации для образца в целом в действительности не характеризует средние свойства кристаллов, из которых состоит образец.

Кривые напряжение – деформация для поликристаллических образцов, показывающие поведение металла при пластической деформации, несомненно, имеют важное практическое значение и прежде всего для процессов упрочняющей обработки.

Анализ известных работ и практика применения ППД свидетельствуют о том, что деформационное действие инструмента на обрабатываемую поверхность детали, по существу, представляет собой процесс сжатия в различных условиях контактирования (по форме и площади пятна контакта), действующей нагрузки и времени деформирования.

При упрочнении ППД, как и в процессах классического растяжения и сжатия образцов, решающее влияние оказывают нагрузка, время ее действия и температура нагрева. Тепловым фактором в процессах ППД обычно пренебрегают из-за небольших температур – до 200–300° С.

Кривые сжатия (можно управлять поверхностной деформацией изменением действующей нагрузки), как правило, аналогичны представленной (рис. 5) кривой напряжение–деформация при растяжении поликристаллических металлов.

Величина деформации  $\epsilon$  в процессах упрочняющей обработки неопределенна, а оценка ведется обычно по ее аналогу – глубине внедрения деформирующего инструмента в обрабатываемую поверхность детали. Характер изменения глубины внедрения инструмента обычно соответствует ходу кривой  $\sigma$ – $\epsilon$ .

Наиболее эффективны известные методы ППД для отделочно-упрочняющей обработки пластичных металлов и сплавов, у которых сохраняется большой резерв по пластичности и при упрочнении которых можно управлять поверхностной деформацией изменением действующей нагрузки.

Особое место в технологии упрочняющей обработки занимают закаленные стали и высокопрочные чугуны, свойства и область применения которых при изготовлении автомобилей приведены ниже (табл. 1).

Приведена информация о пластичности сталей в отожженном состоянии, а их твердость – после закалки (табл. 1). Пластические свойства закаленных сталей в справочной литературе отсутствуют.

Таблица 1

Свойства сталей и высокопрочного чугуна

Обрабатываемая деталь	Материал	Твердость	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %
Коленчатый вал	Чугун ВЧ 75-50-03	50 HRC	500	750	3
Вал первичный коробки передач	Сталь 20ХГНМ	≥58 HRC	950	1200–1600	7
Полуось заднего моста	Сталь 38	48 HRC	310	560–750	17
Корпус внутреннего цилиндра	Сталь 19ХГН	58–62 HRC	950	1100–1550	7
Фланец крепления карданного вала к ведущему валу редукторной коробки	Сталь 43	165–215 НВ	500	700	15

Об уровне пластичности закаленных сталей, их возможной деформации до разрушения и величинах деформационного напряжения в реальных условиях упрочняющей обработки можно только предполагать.

По оценкам А.В. Орлова и С.В. Пинегина, обнаружить, например, остаточную деформацию при вдавливании шаров в полированную поверхность плоских образцов из закаленной стали ШХ15 твердостью 60–61 HRC можно только при напряжениях порядка 2500 МПа, что в два раза превышает предел прочности отожженной стали.

В этой связи режим упрочняющей обработки закаленных сталей, а также высокопрочных чугунов можно определять только эмпирически, подбирая их таким образом, чтобы гарантированно исключить перенаклеп и возможное растрескивание обработанной поверхности детали.

Чтобы установить оптимальные условия упрочняющей обработки, в частности, процесса выглаживания металлов с ограниченным потенци-

алом по его пластичности и упрочняемости и с повышенной склонностью к хрупкому разрушению, необходимо получить ясное представление об условиях нагружения упрочняемой детали, включая форму и площадь пятна контакта, интенсивность нагрузки и время ее действия.

### **Контрольные вопросы**

1. Как и в какой степени ППД влияет на долговечность деталей?
2. Что такое наклеп и как он образуется в процессе обработки?
3. Как устанавливается режим обработки закаленных сталей?

#### 4. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ППД ОБКАТЫВАНИЕМ И ВЫГЛАЖИВАНИЕМ

В данном учебном пособии рассматривается новая технология отделочно-упрочняющей обработки методом выглаживания широким самоустанавливающимся инструментом – выглаживателем.

У этого метода есть определенные преимущества в сравнении с известными методами упрочнения по механизму и скорости воздействия на поверхность обрабатываемой детали. Широкое выглаживание обладает также особенностями, которые присущи его близким аналогам – упрочнению методом обкатывания роликом (или шаром) и алмазному выглаживанию.

В работе В.М. Смелянского рассмотрена технологическая сущность методов поверхностного пластического деформирования, которые относятся к методам статического поверхностного деформирования.

ППД – это обработка деталей давлением (без снятия стружки), при которой пластически деформируется только их поверхностный слой. ППД осуществляется инструментом, деформирующие элементы которого (шарики, ролики или тела иной конфигурации) взаимодействуют с обрабатываемой поверхностью по схемам качения, скольжения или внедрения (рис. 6).

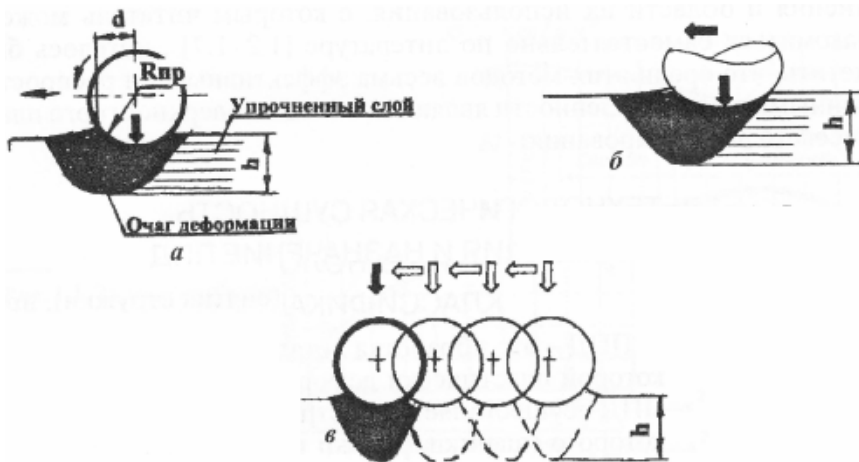


Рис. 6. Основные схемы взаимодействия деформирующего элемента с обрабатываемой поверхностью: а – качение; б – скольжение; в – внедрение



На этих элементарных схемах или их сочетании основаны все методы ППД.

При ППД по схеме качения ролик или шарик прижимается к поверхности детали с фиксированной силой  $P$ , перемещается относительно нее, совершая при этом вращение вокруг своей оси (рис. 6,а). В зоне локального контакта деформирующего элемента с обрабатываемой поверхностью возникает очаг пластической деформации, который перемещается вместе с инструментом, благодаря чему поверхностный слой последовательно деформируется на глубину  $h$ , равную глубине распространения очага деформации. Размеры очага деформации зависят от технологических факторов обработки – силы  $P$ , формы и размеров деформирующего элемента, подачи, твердости обрабатываемого материала и др.

От этих же факторов зависят интенсивность пластической деформации поверхностного слоя и, как результат, – качественные изменения в нем: снижение шероховатости поверхности, повышение твердости, предела текучести металла, возникновение сжимающих остаточных напряжений и т. д. В свою очередь, изменение состояния (модификация) поверхностного слоя может при правильно выбранной технологии в несколько раз повысить долговечность и другие эксплуатационные свойства деталей.

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 деформирующим элементом и обрабатываемым материалом.

В инструментах для накатывания деформирующие элементы устанавливаются на опорах качения или располагаются в сепараторах.

К методам ППД, в которых деформирующие элементы работают по схеме скольжения (рис. 6,б), относятся выглаживание и дорнование. Для этих процессов деформирующие элементы должны изготавливаться из материалов, имеющих высокую твердость (алмаз, твердый

сплав и т. п.) и не склонных к адгезионному схватыванию с обрабатываемым материалом.

Выглаживание применяется для ППД закаленных сталей и деталей маложестких, т. е. тогда, когда невозможно применить обработку накатыванием. Недостатками выглаживания являются низкая производительность и невысокая стойкость инструмента.

Дорнование (синонимы: деформирующее протягивание, калибрование) применяется для обработки отверстий. Это высокопроизводительный процесс, сочетающий 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 деформирующего элемента и отверстия. При определенных соотношениях натяга и толщины стенки пластическая деформация может привести к раздаче цилиндра по диаметру, в связи с чем произойдет калибрование отверстия.

Существуют различные конструкции инструментов для накатывания, выглаживания и дорнования, которые разработаны для самого широкого круга деталей и поверхностей.

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

Наряду с этими методами в машиностроении существует большое число методов ППД, основанных на динамическом (ударном) воздействии инструмента на поверхность детали.

Обкатывание и алмазное выглаживание являются наиболее простыми и эффективными методами отделочно-упрочняющей обработки. Несмотря на то что при обкатывании роликом или шарами имеет место качение с проскальзыванием, а при алмазном выглаживании — скольжение, между ними имеется сходство как в механизме образования микропрофиля и характере деформации поверхностного слоя, так и в соотношении действующих сил и коэффициентов трения. Это сходство позволяет установить некоторые общие закономерности для обоих процессов, на основе чего могут быть установлены рациональ-

ные области их применения и оптимальные режимы обработки, описанные в работах Д.Д. Папшева<sup>1</sup>.

**Упрочнение методом обкатывания.** Обкатывание роликом или шарами чаще всего производится на токарных или специальных станках. В первом случае обрабатываемая деталь в зависимости от ее конструкции закрепляется в центрах или патроне, а обкатное приспособление (обкатник) – в резцедержателе. Рабочая головка универсального обкатника (рис. 7) состоит из штока 1, в передней части которого в пазу находятся два шариковых подшипника 2. На подшипники опирается деформирующий шар 3, предохраняемый от выпадания колпачком 4. Рабочая головка монтируется в корпусе обкатника. Давление при обкатывании может быть создано тарированной пружиной, а также при помощи пневматического или гидравлического механизма. Род силового механизма определяет конструкцию корпуса обкатника. Применяемые в машиностроении конструкции обкатников (и выглаживателей) можно разделить на два основных типа: 1) обкатники с «жестким» контактом между деформирующим инструментом и обрабатываемой поверхностью; 2) обкатники с упругим контактом между деформирующим инструментом и обрабатываемой поверхностью.

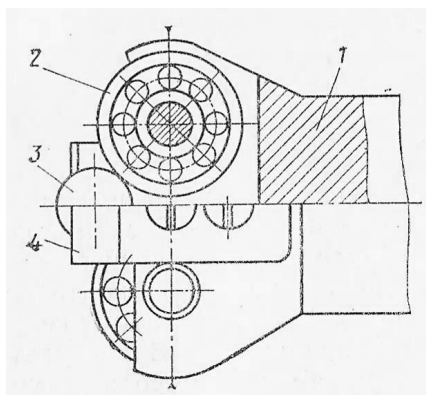


Рис. 7. Рабочая головка шарикового обкатника

В обкатниках первого типа требуемая нормальная сила создается за счет поперечной подачи обкатника (или выглаживателя), осуществ-

<sup>1</sup> Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. М. : Машиностроение, 1978. – 152 с.

вляемой винтом поперечной подачи станка, а иногда – при помощи груза. Обкатники с «жестким» контактом более просты в изготовлении. Однако они не могут обеспечить равномерного упрочнения всей обрабатываемой поверхности вследствие неточностей формы заготовки, погрешности ее установки на станке, различного прогиба по длине детали от давления инструмента, наличия в основном металле различных включений с иными механическими свойствами. Поэтому обкатники с «жестким контактом» не нашли широкого применения.

Обработка обкатниками и выглаживателями с упругим контактом между инструментом и обрабатываемой поверхностью предпочтительнее. Контакт осуществляется при помощи тарированной пружины, а также при помощи пневматического или гидравлического силового механизма. При упругом контакте траектория перемещения деформирующего инструмента в процессе обработки определяется формой исходной заготовки. Поскольку нормальная сила при обработке сохраняется постоянной, то практически не изменяется и форма исходной заготовки. Погрешности установки также практически не отражаются на результатах упрочнения. Следовательно, при упругом контакте достигается более равномерный наклеп всей обработанной поверхности. Следует иметь в виду, что погрешности формы детали в этом случае не исправляются.

В процессе обработки деталь вращается, а деформирующий инструмент (шар), находящийся в контакте с обрабатываемой поверхностью, вместе с обкатным приспособлением имеет продольную подачу. Благодаря самоустанавливаемости шара во время обкатывания обеспечивается его свободное вращение при трении качения между шаром и деталью. В силу этого и создаются более благоприятные условия для пластической деформации, обеспечивающие получение менее шероховатой поверхности при небольшом давлении шара.

В производственной практике применяется и обкатывание роликами. Однако этот способ используется главным образом в тех случаях, когда необходимо получить глубокий упрочненный слой, например, в тяжелом машиностроении. Для отделочно-упрочняющей обработки обкатывание роликом применяется редко.

По сравнению с обкатыванием роликами (как правило, специально изготавливаемыми для этой цели) обкатывание шарами обладает рядом

преимуществ: 1) простота конструкции и универсального приспособления (обкатника); 2) применение высококачественных и низких по стоимости стандартных шариков, выпускаемых промышленностью; 3) создание наивыгоднейших условий процесса обкатывания благодаря самоустанавливаемости шаров; 4) достижение высоких контактных давлений при сравнительно небольших силах  $P_H$ , передаваемых со стороны деформирующего инструмента на обрабатываемую поверхность детали.

Как уже говорилось, обкатывание происходит в условиях трения качения с проскальзыванием. Коэффициент трения зависит от свойств материала и условий контактирования и составляет 0,07–0,12. С увеличением нормальной силы, подачи, более грубой исходной поверхности и с понижением твердости обрабатываемого материала коэффициент трения увеличивается. Более подробно вопрос о коэффициенте трения и его структуре (деформационной и адгезионной составляющих) рассматривается в разделе об алмазном выглаживании (см. ниже).

Процесс обкатывания рекомендуется производить с применением смазочно-охлаждающей жидкости, для чего используется индустриальное масло 20 и его смесь с 2–3% олеиновой кислоты. При смазке снижается коэффициент трения, температура контактных поверхностей становится ниже, что оказывает влияние на протекание процесса деформации и способствует получению менее шероховатой поверхности. Кроме того, при работе в условиях смазки повышается стойкость деформирующего инструмента.

**Алмазное выглаживание.** При алмазном выглаживании деформирующим инструментом является кристалл алмаза, находящийся в специальной оправке. Закрепляется алмаз чаще всего пайкой при помощи серебряного припоя, имеющего сравнительно низкую температуру плавления (600–650° С). Универсальный выглаживатель (рис. 8) состоит из оправки 1 и алмаза 2.

Выглаживатель монтируется в специальном приспособлении, устанавливаемом в резцедержателе токарного станка. Давление при выглаживании с упругим контактом обычно создается с помощью тарированной пружины. При вращении обрабатываемой детали продольную подачу имеет инструмент. Выглаживание производится в условиях трения скольжения, что отличает этот процесс от обкатывания. Ввиду высокой твердости алмаза выглаживание успешно применяется для

отделочно-упрочняющей обработки деталей из различных материалов, в частности, из закаленных сталей в разных структурных состояниях.

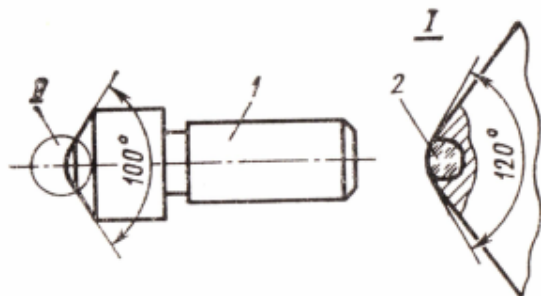


Рис. 8. Алмазный выглаживатель

При выглаживании алмаз практически не деформируется. Вследствие этого, а также ввиду небольшого радиуса сферы его рабочей части (в практике применяются выглаживатели с радиусом сферы алмаза 0,5–3,5 мм) поверхность контакта инструмента с деталью оказывается незначительной. Это обуславливает создание высоких контактных давлений, необходимых для свершения пластической деформации при небольших нормальных силах, передаваемых со стороны деформирующего инструмента на обрабатываемую поверхность детали. Нормальная сила при выглаживании составляет 5–30 кгс, что значительно меньше по сравнению с обкатыванием шаром. Кроме высокой твердости алмаз обладает низким коэффициентом трения по металлу и высокой теплопроводностью. Возможность полирования его рабочей сферы с высокой степенью чистоты обеспечивает в процессе выглаживания блестящую поверхность с низкой шероховатостью.

При выглаживании алмазным инструментом, внедряемым в металл под действием нормальной силы, на поверхности контакта возникают силы трения. Интенсивность внешнего трения при поверхностном пластическом деформировании зависит от свойств материала, величины деформирующих напряжений, характера и формы контакта, а также адгезионных связей, возникающих между инструментом и обрабатываемой поверхностью. В условиях пластического контакта (при

выглаживании) коэффициент трения включает деформационную  $f_{\text{деф}}$  и адгезионную  $f_{\text{адг}}$  составляющие:

$$f = f_{\text{деф}} + f_{\text{адг}}$$

Деформационная составляющая может быть определена по приближенной формуле

$$f_{\text{деф}} = 0,55 \cdot \sqrt{\frac{h_B}{R}}, \quad (2)$$

где  $h_B$  – глубина внедрения выглаживателя;  $R$  – радиус его рабочей части.

Величина адгезионной составляющей, особенно при применении СОЖ, уменьшающей адгезионное взаимодействие, для большинства материалов незначительна ( $f_{\text{адг}} = 0,01 \dots 0,05$ ) и, по мнению В.М. Торбило, зависит только от обрабатываемого материала и его шероховатости, а не от режимов обработки. Следует, однако, отметить, что при выглаживании некоторых материалов, в частности титана, адгезионное взаимодействие между алмазом и обрабатываемым металлом настолько усиливается, что коэффициент трения возрастает и частицы титана налипают на рабочую поверхность инструмента. В таких случаях алмазное выглаживание оказывается неэффективным.

Исследованиями установлено, что с возрастанием силы  $P_B$  коэффициент трения увеличивается и достигает наибольшего значения при оптимальной величине  $P_B$  (рис. 9). Возрастание коэффициента объясняется одновременным увеличением нормальной силы и глубины внедрения выглаживателя и, следовательно, возрастанием деформационной составляющей  $f_{\text{деф}}$ . По мере дальнейшего увеличения нормальной силы затрудняется внедрение инструмента, что замедляет, а затем и приостанавливает возрастание деформационной составляющей.

Глубина внедрения инструмента в металл, а следовательно, и коэффициент трения при выглаживании существенным образом зависят от твердости металла. Экспериментальными исследованиями при выглаживании различных материалов с оптимальными силами установлена связь между твердостью и коэффициентом трения.

С повышением твердости глубина внедрения инструмента уменьшается, что приводит, по мнению Л.А. Хворостухина и Н.И. Ильина<sup>2</sup>,

---

<sup>2</sup> Хворостухин Л.А., Ильин Н.И. Трение при алмазном выглаживании металлов и сплавов // Вестник машиностроения. 1973. № 11. – С. 64–65.

к снижению деформационной составляющей  $f_{\text{деф}}$ , а следовательно, и коэффициента трения (рис. 10).

На коэффициент трения, как следует из формулы (1), влияет радиус сферы алмаза. Это влияние связано с изменением глубины внедрения при изменении радиуса. Некоторое влияние на трение оказывают подача и скорость выглаживания.

Необходимо отметить, что общий коэффициент трения при выглаживании разных материалов, по данным Я.И. Бараца и В.М. Торбило, составляет 0,03–0,12.

Для снижения трения, повышения стойкости инструмента, охлаждения и получения после выглаживания менее шероховатой поверхности применяется смазочно-охлаждающая жидкость: индустриальное масло 20 и сульфофрезол. По данным Э.Г. Грановского<sup>3</sup>, при алмазном выглаживании при применении индустриального масла износ инструмента снижается почти в 5 раз по сравнению с обработкой без СОТС.

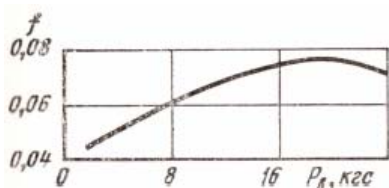


Рис. 9. Зависимость коэффициента трения  $f$  от силы при алмазном выглаживании цементованной стали 12Х2Н4А

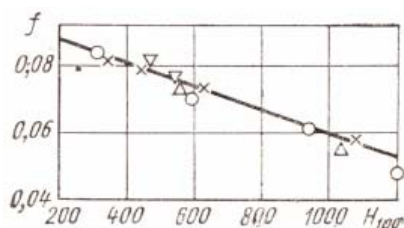


Рис. 10. Зависимость коэффициента трения от микротвердости при выглаживании разных сталей

**Основные параметры процесса упрочнения обкатыванием и алмазным выглаживанием.** При алмазном выглаживании и обкатывании шероховатость обработанной поверхности и упрочнение детали зависят от параметров процесса. При правильно заданных параметрах обработки деталь приобретает высокие эксплуатационные свойства. И наоборот, неудачный выбор даже одного из параметров, например давления, может вызвать частичное разрушение поверхности (отслаивание) и понизить долговечность детали. Глубина упрочненного слоя определяется

<sup>3</sup> Грановский Э.Г. Измерение износа алмазных выглаживателей // Известия вузов. 1968. № 11. – С. 128–131.



удельным давлением на контактной площади и ее размерами. Степень же упрочнения зависит только от давления. Это подтверждается малой глубиной наклепа и повышением поверхностной твердости, получаемыми в результате дробеструйной обработки. При ударе дробинки, несмотря на высокие давления, незначительность размеров контактных площадок приводит к распространению пластической деформации на небольшую глубину.

Глубина наклепа связана с диаметром отпечатка при вдавливании сферического пуансона, с размерами эллипса касания при упругом контакте двух тел, с величиной сближения инструмента и детали или с удельным давлением и диаметром шара. Во всех случаях прямо или косвенно имеет значение размер контактной площади.

Специальными экспериментами в работах Д.Д. Папшева установлена зависимость глубины наклепа  $\Delta$  от размеров контактной площади  $F_k$ . Эта зависимость, полученная при обкатывании шаром (рис. 11), выражается формулой

$$\Delta = k \cdot \sqrt[n]{F_k}, \quad (3)$$

где  $k$  и  $n$  – коэффициенты, зависящие от размеров инструмента, а также от размеров и материала детали.

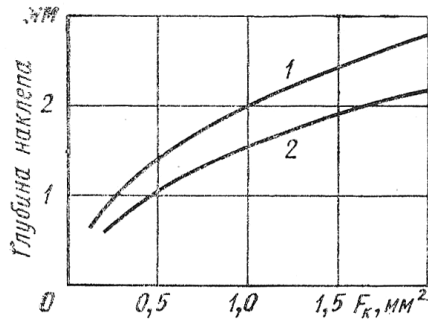


Рис. 11. Зависимость глубины наклепа от площади контакта при обкатывании валиков с давлением: 1 – 250 кгс/мм<sup>2</sup>; 2 – 140 кгс/мм<sup>2</sup>

Для деталей средних размеров из стали 45 при их обкатывании шаром диаметром 10 мм с давлениями в контакте 140–250 кгс/мм<sup>2</sup> коэффициент  $k = 1,48–2,0$ , а  $n = 2$ . Коэффициент  $k$  возрастает с повышением давления.

Основными параметрами процессов выглаживания и обкатывания являются следующие: 1) среднее давление в контакте  $p$ ; 2) контактная площадь  $F_k$ ; 3) величина нормальной силы, передаваемой со стороны инструмента на обрабатываемую поверхность; 4) размеры деформирующего инструмента  $R$ ; 5) продольная подача  $s$ ; 6) скорость обработки  $v$ . Первые два параметра, определяющие эффективность упрочнения, зависят от силы, размеров инструмента, свойств материала и размеров обрабатываемой детали. Продольная подача влияет на шероховатость обрабатываемой поверхности и равномерность деформации в осевом направлении. Кроме того, подача определяет количество повторных деформаций каждого участка поверхности, что оказывает влияние на упрочнение и остаточные напряжения. От скорости обработки зависят протекание процесса деформации в очаге и градиент наклепа, а также количество образующейся теплоты. К остальным параметрам обработки относятся число рабочих ходов и род смазки.

В технологических картах должны быть указаны такие параметры, которые контролируются в процессе обработки. К ним прежде всего относятся нормальная сила  $P_H$  ( $P_B$ ), подача, число проходов и размеры деформирующего инструмента.

**Силы при обкатывании и выглаживании.** Действующие при деформации внешние силы разделяются на активные и реактивные. Силы трения в одних случаях могут быть активными (например, при прокатке), а в других – реактивными (например, при осаживании). При обкатывании и выглаживании активные силы создаются вращением детали (обработка на токарном станке), движением стола с деталью (обработка на строгальном станке) или вращением инструментальной головки. Следовательно, активные силы являются касательными. При действии этих сил площадь давления в процессе деформации остается неизменной. Реактивные силы направлены перпендикулярно к рабочей поверхности инструмента.

Процессы, происходящие при обкатывании и выглаживании в очаге деформации, определяются характером распределения и величиной нормальных и касательных напряжений. Однако ввиду незначительности коэффициентов трения в обоих процессах основное значение имеют нормальные напряжения. Величина силы, обеспечивающей получение требуемых напряжений в очаге деформации, зависит от их

значений и размеров контактной площади. При обработке с продольной подачей равнодействующая всех сил раскладывается на три составляющие силы (по трем координатным осям). В соответствии с этим различают силы – нормальную, касательную и силу подачи (рис. 12). Основной силой, создающей необходимое давление в контакте деформирующего инструмента и детали, является нормальная составляющая  $P_H$ . Определение касательной силы необходимо для расчета потребной мощности главного движения и расчета силы подачи необходимой для расчета на прочность механизма подачи.

$$\text{Равнодействующая сила } R = \sqrt{P_H^2 + P_T^2 + P_O^2}.$$

Экспериментальное исследование силы при обкатывании шаром производилось на токарном станке при помощи специального трехкомпонентного динамометра. Результаты исследования (рис. 12) показывают, что касательная сила  $P_T$  в среднем в 10 раз меньше нормальной силы. Изменение подачи слабо сказывается на соотношении этих сил. При обкатывании грубой поверхности с большими неровностями касательная сила несколько возрастает. Величина осевой силы незначительно отличается (в сторону уменьшения) от касательной силы.

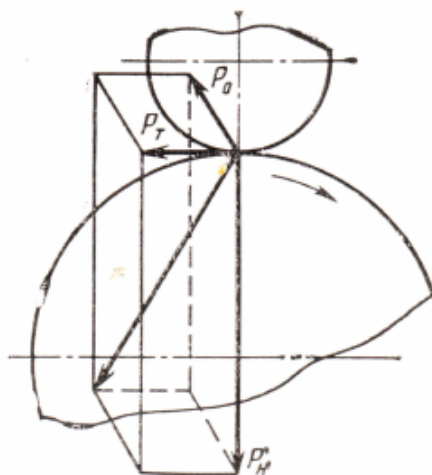


Рис. 12. Схема сил, действующих при обкатывании и выглаживании

На основании экспериментальных данных при отделочно-упрочняющем обкатывании имеем  $P_T/P_H = 0,07-0,12$ ;  $P_O/P_H = 0,05-0,1$ . Учитывая приведенное соотношение, величину равнодействующей силы выразим через силу  $P_H$ :

$$R = \sqrt{P_H^2 + [(0,07 \div 0,12)P_H]^2 + [(0,05 \div 0,1)P_H]^2} = (1,004 \div 1,012)P_H.$$

Равнодействующая сила  $R$  отличается от величины нормальной силы не более чем на  $0,4-1,2\%$ .

При алмазном выглаживании различных материалов  $P_T/P_H = 0,03-0,12$ , т. е. соотношение сил почти такое же, как и при обкатывании шаром. Так как при выглаживании осевая сила  $P_O$  значительно меньше силы  $P_T$ , то с погрешностью, не превышающей десятые доли процента, можно записать, что равнодействующая сила  $R = P_B$ . Величина сил  $P_T$  и  $P_O$  главным образом зависит от величины нормальной силы  $P_B$ , скорости обработки, радиуса деформирующего инструмента, наличия смазки и свойств материала, т. е. от параметров, определяющих коэффициент трения. Особенно сильно эта зависимость проявляется для алмазного выглаживания в условиях трения скольжения.

С увеличением нормальной силы при обкатывании силы  $P_T$  и  $P_O$  также увеличиваются (рис. 13), а при выглаживании ее характеризует изменение коэффициента трения (рис. 9). С увеличением скорости скольжения при выглаживании деталей из сталей 40ХГН2СВА и 30ХГСНА коэффициент трения снижается более чем в 2 раза, по А.Ф. Митряеву, Ю.Н. Серяпину и др.<sup>4</sup> Минимальные значения сил  $P_T$  и  $P_O$  наблюдаются при выглаживании с применением СОЖ. При обкатывании влияние на силы  $P_T$  и  $P_O$  скорости и смазки незначительно.

Коэффициент трения  $f$  понижается с повышением твердости и увеличением радиуса сферы инструмента. В этом случае силы  $P_T$  и  $P_O$  будут снижаться.

Величину нормальной силы определяют по выражению, предложенному Д.Д. Папшевым:

$$P_H = \pi r (R \sin \alpha)^2, \quad (4)$$

<sup>4</sup> Митряев А.Ф., Серяпин Ю.Н. и др. Отделочно-упрочняющая обработка алмазным инструментом как метод повышения прочности высокопрочных сталей. М., 1971.

где  $\rho$  – среднее контактное давление;  $R$  – радиус деформирующего инструмента;  $\alpha$  – угол вдавливания, зависящий от свойств материала, размеров детали и инструмента. При отделочно-упрочняющем обкатывании наружных цилиндрических поверхностей угол составляет от  $5^{\circ}30'$  до  $7^{\circ}30'$ . Эти данные получены при обкатывании шаром диаметром 5–10 мм.

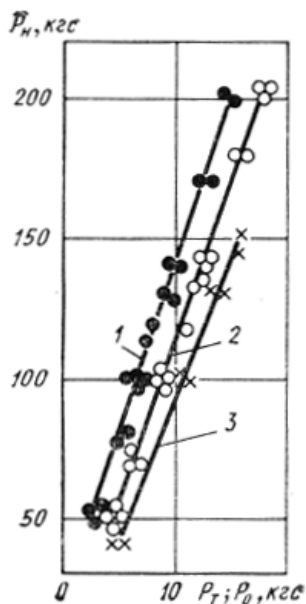


Рис. 13. Схема сил при обкатывании валиков из стали 45 с подачи 0,1 мм/об: 1 – осевая сила; 2 – касательная сила при нормальной шероховатости поверхности; 3 – касательная сила при грубой поверхности

Нормальную силу при алмазном выглаживании можно также определять по формуле В.М. Торбило<sup>5</sup>:

$$P_B = \pi \cdot \epsilon \cdot HV R^2, \quad (5)$$

где относительная глубина внедрения алмаза  $\epsilon = 0,0015-0,007$ ;  $HV$  – твердость по Виккерсу.

<sup>5</sup> Торбило В.М. Алмазное выглаживание и его эффективность. М. : НИИавтопром, 1966. – 80 с.

Следует отметить, что произведения  $(\rho \cdot \sin^2\alpha)$  и  $(\epsilon HV)$  в формулах (3) и (4) характеризуют величину деформации детали в зоне ее контакта с инструментом в процессе обработки. Однако величина деформации в формулах выражена различно. В формуле (3) контактная площадь инструмента с деталью определяется как  $\pi(R\sin\alpha)^2$ , что является грубым приближением. Более точное выражение для контактной площади имеет следующий вид:

$$F_K = \frac{8}{3} \cdot R \sqrt{\frac{R_d}{R_d \pm R}} \left[ \sqrt{(h + \omega)\omega} + \omega + \frac{1}{4} \sqrt{\omega h} \right], \quad (6)$$

где  $R$  – радиус шара или рабочей части алмаза;  $R_d$  – радиус детали;  $h$  – остаточная деформация;  $\omega$  – местная упругая деформация детали и инструмента. Величина  $h$  определяется экспериментально, а величина  $\omega$  рассчитывается по формулам теории упругости. Знак «плюс» в знаменателе первого подкоренного выражения в формуле (6) следует ставить при расчете  $F_K$  в случае обработки наружных цилиндрических поверхностей, а знак «минус» – при обработке отверстий.

Обработка обкатыванием и выглаживанием может осуществляться только при рабочих напряжениях, вызывающих пластическую деформацию. При наличии между деталью и деформирующим инструментом только упругой связи обработка не производится. При нормальном протекании процесса поверхностного пластического деформирования рабочая часть инструмента внедрена на определенную глубину в обрабатываемую поверхность детали. При этом необходимо выдержать условие  $\epsilon_2 > \epsilon > \epsilon_1$ , где относительная глубина внедрения  $\epsilon = \frac{h}{R}$ ;  $\epsilon_1$  – относительная глубина внедрения, при которой рабочие напряжения вызывают пластическую деформацию, а  $\epsilon_2$  – относительная глубина внедрения, при которой прекращается пластическое течение и начинается разрушение поверхности детали. При алмазном выглаживании  $\epsilon_1 = 0,002-0,004$  для закаленных сталей и  $\epsilon_1 = 0,0002-0,0007$  для мягких материалов. Предельным значением  $\epsilon_2$  является  $0,01-0,02$ . Величина относительного внедрения  $\epsilon$  должна быть выбрана между  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$  в зависимости от требуемого упрочнения.

Нормальное протекание процесса правильнее выразить через среднее давление в контакте. В этом случае для обоих методов можно

записать  $\rho_1 > \rho > \rho_2$ , где  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – давления в контакте, обеспечивающие относительную глубину внедрения инструмента соответственно  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$ . По мере увеличения нормальной силы давление в контакте также растет. Однако это происходит до тех пор, пока не будет исчерпана способность металла к деформированию. При дальнейшем увеличении силы начинает разрушаться поверхностный слой. При этом давление достигает критического значения  $\rho_2$ .

Данные, полученные Ю.В. Ивановым при исследовании упрочнения роликов из стали 55СМ5ФА (HRC55–58) методом обкатывания, представлены ниже (табл. 2).

Таблица 2

Результаты определения  $h$ ,  $\omega$ ,  $F_k$  и  $\rho$

$P_H$ , кгс	$h$ , мм	$\omega$ , мм	$F_k$ , мм <sup>2</sup>	$\rho$ , кгс/мм <sup>2</sup>
50	0,0030	0,0175	0,078	180,0
100	0,0150	0,0276	0,424	236,0
150	0,0258	0,0365	0,582	257,0
200	0,0411	0,0442	0,741	270,0
250	0,0630	0,0480	0,855	269,0

В качестве деформирующего инструмента применялись шары диаметром 6 мм. При давлении 270 кгс/мм<sup>2</sup> происходит снижение поверхностной твердости, свидетельствующее о перенаклепе и начавшемся разрушении поверхности. В данном случае критическим является давление  $\rho_2 = 270$  кгс/мм<sup>2</sup>, а  $\rho_1 = 180$  кгс/мм<sup>2</sup>. При силе 200 кгс, соответствующей давлению  $\rho_2$ , резко возрастает остаточная деформация  $h$ , что вызывает увеличение контактной площади. В этом случае остаточная и упругая деформации оказались примерно одинаковыми. Таким образом, значительное увеличение  $h$  и  $F_k$  свидетельствует об опасности разрушения металла.

### Контрольные вопросы

1. Чем отличаются обработка обкатыванием и обработка выглаживанием?
2. Какие параметры являются определяющими при обработке ППД?
3. Что такое рабочие напряжения и как они влияют на процесс обработки?

## 5. УСТОЙЧИВОСТЬ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ДЕТАЛЕЙ

Физическое состояние поверхностного слоя деталей и его напряженность, обусловленные упрочняющей обработкой, оказывают существенное влияние на эксплуатационные свойства, прежде всего на их усталостную прочность. Остаточные напряжения и деформационное упрочнение поверхностного слоя в условиях циклического нагружения и рабочих температур могут положительно и отрицательно влиять на сопротивление материала усталости. В связи с этим представляет большой интерес изучение устойчивости поверхностного наклепа и остаточных макронапряжений после упрочняющей обработки в зависимости от температуры и продолжительности нагрева.

Изменение кристаллической структуры, обусловленное деформацией, есть отклонение от равновесных условий в металле. При этом свободная энергия кристаллической решетки возрастает.

Состояние поверхностного деформированного слоя детали с большой плотностью дислокаций вследствие неупорядоченного и неравномерного распределения дислокаций по объему характеризуется высокой термодинамической неустойчивостью (метастабильностью) при всех температурах. Поэтому структура деформированного металла имеет тенденцию к переходу в более стабильное состояние с меньшей свободной энергией, к восстановлению равновесных условий. Это восстановление возможно в результате различных термически активированных элементарных процессов, проходящих либо во время деформации, либо после нее.

В зависимости от степени и характера деформации, температуры, скорости и продолжительности нагрева и других факторов все эти процессы совершаются последовательно или накладываются один на другой. Поэтому снятие наклепа в структуре и изменения в свойствах металла могут протекать разными путями и с разной полнотой.

Различают следующие стадии процесса снятия наклепа при нагреве: возврат — отдых и полигонизация;

рекристаллизация — первичная (рекристаллизация обработки) и вторичная или прерывистый (аномальный) рост зерен.

**Возврат.** Возврат включает все процессы до начала рекристаллизации: уменьшение концентрации точечных дефектов и перераспределе-



ние дислокаций без образования новых границ (отдых) или с образованием и миграцией малоугловых границ (полигонизация).

Отдых протекает при сравнительно низких температурах, он связан со снятием упругих искажений в решетке вследствие перемещения атомов на небольшие расстояния (меньше межатомных) или пластических сдвигов в пределах отдельных зерен.

Отдых проявляется в частичном восстановлении физических свойств недеформированного металла без существенных изменений в структуре и, как правило, без изменения ориентировки зерен.

**Рекристаллизация.** Первичная рекристаллизация – процесс изменения структуры деформированных металлов и сплавов при их нагреве, следующий за полигонизацией. Рекристаллизация представляет собой перераспределение атомов металла в новое кристаллическое образование, обеспечивающее снижение объемной энергии деформированных зерен за счет уменьшения числа дефектов структуры и восстановление структуры и свойств недеформированного материала.

Сущность процесса рекристаллизации состоит в формировании и росте в деформированной матрице центров рекристаллизации – новых зерен с неискаженной решеткой, отделенных от матрицы границами с большими углами разориентировки.

Первичная рекристаллизация протекает только при нагреве металла, деформированного с определенной (критической) степенью, зависящей от условий деформации.

Критическая степень деформации металлов и сплавов  $\varepsilon_{кр} \approx 1,5–8,5\%$ . Специальными опытами установлено, что  $\varepsilon_{кр}$  зависит от многих факторов, в том числе от условий деформации и нагрева, исходной микроструктуры, природы и чистоты металла и др.

С повышением температуры нагрева и увеличением скорости деформации значения  $\varepsilon_{кр}$  приближаются к меньшим значениям степени деформации. С увеличением скорости деформации увеличивается также и размер критического зерна.

С повышением температуры предварительной деформации в до-рекристаллизационной области (тепловая деформация)  $\varepsilon_{кр}$  смещается в сторону больших степеней деформации.

Минимальную температуру рекристаллизации (после сильной деформации и длительного отжига) обычно принимают за температур-

ный порог рекристаллизации. Степень деформации, выше которой температура начала рекристаллизации практически не снижается, в большинстве случаев равна 60–70%. Длительность отжига, увеличение которой практически не влияет на температуру начала рекристаллизации, обычно равна 1–3 ч.

Отдых, полигонизация и рекристаллизация связаны между собой и приводят к понижению свободной энергии зерен после наклепа.

Между возвратом и рекристаллизацией нельзя провести четкой границы. Отдельные стадии возврата в какой-то мере развиваются во время пластической деформации и тем в большей степени, чем больше продолжительность деформирования и чем выше отношение температуры деформации металла к температуре его плавления. Возврат и рекристаллизация в определенном температурно-временном интервале протекают одновременно, и в большинстве случаев разделить их невозможно.

**Изменение энергии, структуры и свойств деформированных металлов и сплавов при нагреве.** Кристаллическая решетка пластически деформированного металла обладает большим количеством энергии, чем недеформированного, поэтому состояние наклепанного металла является термодинамически неустойчивым.

Изменение структуры деформированного металла при нагреве и приближение ее к структуре недеформированного металла сопровождается уменьшением внутренней энергии (скрытой энергии наклепа) и восстановлением структурно-чувствительных свойств до значений, которыми металл обладал перед пластической деформацией. При этом свойства, структура и накопленная энергия могут восстанавливаться в несколько стадий. Это связано с неодинаковой подвижностью дефектов разного вида, зависимостью подвижности дефекта от характера дислокационной структуры и с различной степенью влияния разных дефектов на отдельные свойства.

**Устойчивость поверхностного наклепа при нагреве и действии внешней нагрузки.** Известны единичные работы, в которых изучалась устойчивость деформационного упрочнения поверхностного слоя после упрочняющей обработки, однако результаты их оказались противоречивыми даже для случая длительного хранения деталей в условиях комнатной температуры. Так, при простом отлеживании образцов из

стали 45 после точения в течение 6–7 месяцев существенно снизилась глубина наклепа, микротвердость при этом несколько возросла (от 300 до 385 кгс/мм<sup>2</sup>).

Однако после длительного отлеживания (300 и 500 дней) в эксикаторе при комнатной температуре образцов из стали Ст3 после точения не обнаружено заметных изменений глубины и степени наклепа.

Данных о термической устойчивости поверхностного наклепа, возникающего в процессе механической обработки, еще меньше. Известны лишь единичные работы, результаты которых не дают полного представления о характере изменения глубины и степени наклепа поверхностного слоя при нагреве для обычных конструкционных материалов.

При эксплуатации деталей наблюдается как упрочнение, так и разупрочнение их поверхностного слоя, поэтому структурные изменения в поверхностном слое металла чрезвычайно разнообразны. Они связаны с изменением количества и распределения дефектов кристаллического строения – вакансий, дислокаций, границ зерен и т. д.

Структурные изменения при трении протекают в несколько этапов. На начальном этапе происходит увеличение плотности дислокаций, образование их скоплений, формирование ячеистой и фрагментированной структур. Деформационное упрочнение и, соответственно, тонкая структура по поверхности трущихся деталей при этом имеют неравномерный характер, что обусловлено дискретностью контакта при трении. С увеличением пути трения структура поверхностного слоя становится более однородной, стабилизируется. Это связано с окончанием периода приработки. После периода временной стабилизации структуры поверхностного слоя наступает период разупрочнения. Механизм разупрочнения может быть различным. Например, изменение плотности дислокаций  $\rho_D$  в поверхностном слое никеля при трении по молибдену имеет циклический характер: после повышения происходит ее снижение до исходного уровня, затем опять повышение и т. д. Снижение  $\rho_D$  обусловлено отслаиванием материала тонкой приповерхностной зоны, а также образованием продуктов износа. В других случаях разупрочнение может быть связано с образованием особых «вторичных» структур. Например, в условиях избирательного переноса, характеризующегося чрезвычайно малым износом, падение  $\rho_D$  вблизи поверхности (в слое толщиной  $\sim 1$  мкм) обусловлено адсорбцией поверхностно-активных

веществ смазки на поверхности детали, что облегчает выход дислокаций на нее. При этом вблизи поверхности образуется металлическая пленка с низкой плотностью дислокаций и высокой концентрацией вакансий. Такая структура материала обуславливает малое сопротивление сдвигу и легкие условия формоизменения в зоне контакта. Под этой пленкой находится тонкий оксидный слой и далее слой металла, в котором сохраняется повышенная концентрация дислокаций. Формирование такой структуры связано и с изменением химического состава поверхностного слоя в результате процессов избирательного анодного растворения компонентов сплава и интенсивной диффузии элементов среды и сплава. Избирательный перенос свойствен широкому кругу материалов – меди и ее сплавам, никелю, сталям.

А.М. Сулима и М.И. Евстигнеев после выполненных комплексных исследований на образцах и деталях из различных жаропрочных никелевых сплавов, стали 13X12НВМФА и титанового сплава ВТ9 установили важные особенности релаксации макронапряжений и упрочняющего эффекта от условий эксплуатации.

Релаксация макронапряжений зависит от температуры, продолжительности нагрева и степени деформационного упрочнения поверхностного слоя.

С повышением температуры нагрева и увеличением степени наклепа скорость релаксации макронапряжений возрастает. Максимальную скорость релаксация имеет в начальный момент и далее экспоненциально убывает.

Разупрочнение деформированного поверхностного слоя в условиях изотермического нагрева в вакууме, так же как и релаксация макронапряжений, зависит в основном от температуры и продолжительности нагрева, начальной степени наклепа и макронапряжений.

Чем выше температура нагрева и больше степень наклепа, тем больше скорость разупрочнения. Скорость разупрочнения максимальная в начальный момент и непрерывно уменьшается. Остаточные макронапряжения независимо от их знака способствуют усилению процесса возврата.

У жаропрочных сплавов, которые эксплуатируются при рабочих температурах 1200° С и более, при нагреве от 700° С, а у исследованных стали и титанового сплава – от 400° С начинается интенсивное разуп-

рочнение поверхностного слоя с последующей утратой эксплуатационных свойств, приобретенных в результате упрочняющей обработки.

По-видимому, можно считать, что упрочняющий эффект в полной мере оправдывает себя на деталях, которые эксплуатируются при температурах ниже указанных температурных пределов. Эффективность упрочнения для деталей, работающих при более высоких температурах, будет тем больше, чем меньше степень деформационного упрочнения поверхностного слоя.

### **Контрольные вопросы**

1. Назовите известные стадии при процессе рекристаллизации.
2. Как увеличение температуры влияет на структуру и свойства обработанного материала?
3. Что такое избирательный перенос?

## 6. СВЯЗЬ МЕЖДУ ТВЕРДОСТЬЮ УПРОЧНЯЕМОГО МАТЕРИАЛА И НАПРЯЖЕНИЕМ ЕГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

В данном разделе рассматривается возможная корреляция между твердостью упрочняемого материала и напряжением, которое необходимо для его дальнейшей деформации.

Приведены свойства сталей 38, 43, 19ХГН, 20ХГНМ и высокопрочного чугуна марки ВЧ 75-50-03. Единственная информация, которая дает представление о возможных условиях их упрочнения выглаживанием — это их твердость после закалки в диапазоне 48–62 ед. по HRC для сталей 38, 19ХГН и 20ХГНМ, очень низкая пластичность (по величине относительного удлинения, равного 3%) и твердость 45HRC для высокопрочного чугуна (табл. 1).

Только для стали 43 можно принять во внимание ее свойства для последующих расчетов деформирующего напряжения, так как они соответствуют справочным сведениям.

В основе известных методов отделочно-упрочняющей обработки лежит механизм деформационного упрочнения поверхностного слоя обрабатываемой детали в результате его статического или динамического сжатия.

Для нашей работы представляет интерес вопрос о статическом воздействии индентора — выглаживателя. Известно, что после упрочняющей обработки твердость обработанной поверхности детали повышается тем больше, чем больше будет величина действующего на нее давления.

Этот очевидный факт нашел прямое экспериментальное подтверждение при анализе большого массива экспериментальных данных по взаимосвязи твердости деформированных образцов и напряжения текучести.

В обзорной работе В.А. Кроха<sup>6</sup> собрано большое количество примеров и метод определения величины напряжения текучести, влияния различных факторов на эту величину и экспериментальные кривые упрочнения различных конструкционных металлов и сплавов.

В ней, в частности, приводятся экспериментальные данные по взаимосвязи между действующим напряжением  $S$ , пределом текучести  $S_0$ ,

---

<sup>6</sup> Кроха В.А. Упрочнение металлов при холодной пластической деформации : справочник. — М. : Машиностроение, 1980. — 157 с.

твердостью исходного материала  $HV$  и твердостью деформированных образцов  $HV'$ .

Напряжение текучести и экстраполированный предел текучести определяли по кривым упрочнения при сжатии, построенным по результатам осадки образцов с торцевыми цилиндрическими выточками. Твердость определяли обычным методом на приборе типа ТК с замером ее на торцах и по образующей.

Для определения зависимости между величинами  $S$  и  $HV'$  испытанию подвергали арможелезо, углеродистые и легированные стали, предварительно горячекатаные или термически обработанные (отжиг, нормализация или улучшение).

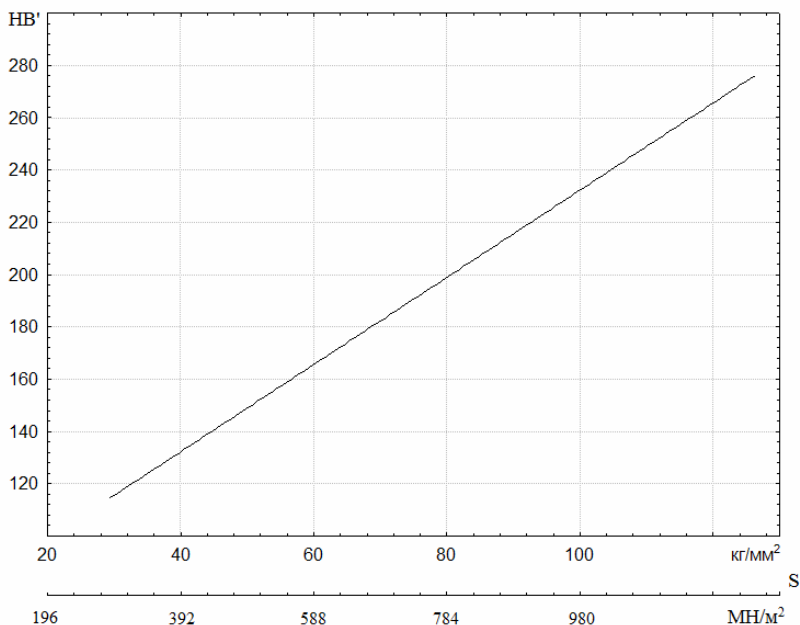


Рис. 14. Взаимосвязь между твердостью и напряжением текучести для арможелеза, сталей 30, 40, 50 и 12ХНЗА в различных термообработанных состояниях

Результаты экспериментальных данных приведены выше (рис. 14), видно, что для всех исследуемых материалов независимо от вида предшествующей обработки и всего диапазона степеней деформации между

напряжением текучести и соответствующей твердостью деформированных образцов имеется линейная зависимость. При обработке опытных данных установлено, что эта зависимость может быть представлена в следующем виде:

$$S = \frac{HB' - 66}{1,65}. \quad (7)$$

Влияние исходной твердости на величину экстраполированного предела текучести при сжатии изучали на примере углеродистых и легированных термически обработанных (отжиг, нормализация, улучшение) и горячекатаных сталей (рис. 15).

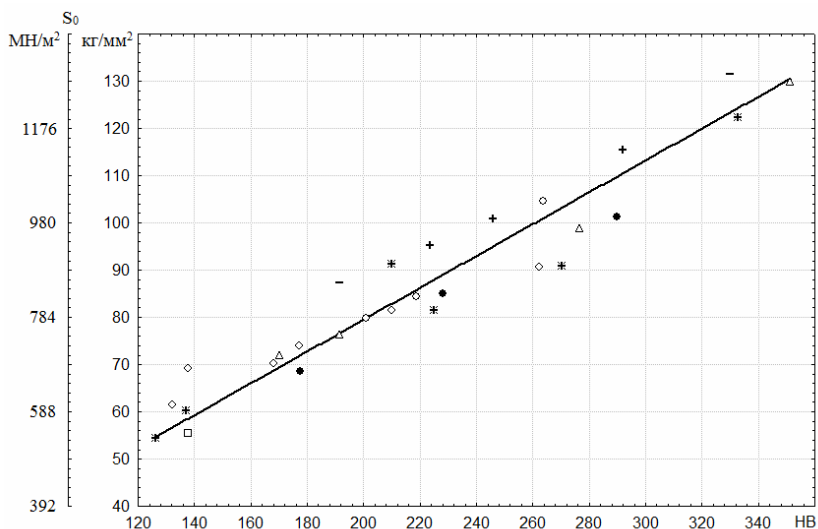


Рис. 15. Зависимость экстраполированного предела текучести при сжатии от твердости исходных образцов из сталей 40, 45, 50, 15X, 20X, 40X, 12ХН3А, 30ХГСА и 40ХНМА

На основании экспериментальных данных установлено, что с увеличением твердости исходных образцов экстраполированный предел текучести возрастает по следующей зависимости:

$$S_0 = 14 + 0,33HB. \quad (8)$$

Основываясь на приведенных экспериментальных данных, можно заключить, что имеется взаимосвязь между твердостью и напряжением пластического течения.



Г.Д. Дель зависимость между твердостью деформированного металла и интенсивностью напряжений при пластическом деформировании положил в основу метода определения напряженного состояния в пластической области по распределению твердости. Его исследованием связи между твердостью, измеренной различными методами, и напряжением при испытании на сжатие широкого круга материалов установлено, что графики твердость – интенсивность напряжений, построенные для различных металлов, не совпадают. Однако все они имеют общую для данного способа измерения твердости огибающую, соответствующую связи между твердостью и пределом текучести идеально пластических материалов. Объясняется это уменьшением упрочняемости металлов с возрастанием деформации.

Если измеряют твердость по Бринеллю, по Виккерсу и микротвердость, огибающая является прямой. При измерении твердости по Роквеллу это кривая. Многочисленные эксперименты показали, что при измерении твердости по Бринеллю огибающая с достаточной точностью описывается уравнением

$$\sigma_0 = (0,32...0,37) \text{ НВ}. \quad (9)$$

Это уравнение находится в хорошем соответствии с решением А.Ю. Ишлинского задачи о внедрении сферического штампа в изотропное идеально пластическое полупространство. Согласно этому решению

$$\sigma_T = 0,383 \text{ НВ}, \quad (10)$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести материала. Некоторое различие в этих двух зависимостях объясняется тем, что в экспериментах, несмотря на большие деформации, не достигалась идеальная пластичность.

В целом, как уже указывалось, тарировочные графики различных материалов не совпадают. Поэтому при определении напряжений по распределению твердости необходимо предварительно по результатам испытаний материала на растяжение, сжатие или кручение и измерений твердости на различных стадиях деформирования строить тарировочный график для каждого из исследуемых материалов.

Принимая во внимание экспериментально установленный факт связи твердости с деформирующим напряжением, можно сделать следующий важный шаг в разработке методологии расчета режима упрочняющей обработки.

Существует подробная классификация из 40 параметров комплексной оценки состояния поверхностного слоя деталей, включая шероховатость, параметры фазового и химического состава, структуры и субструктуры, наклепа, остаточных напряжений и экзoeлектронной эмиссии. Но на практике, особенно для оценки качества упрочнения деталей в производственных условиях, чаще всего используются как наиболее простые и удобные параметры шероховатости обработанной поверхности, а также глубина и степень ее наклепа.

Глубина  $h_n$  и степень наклепа  $U_n$  поверхностного слоя детали являются прямым следствием действия деформирующего напряжения на обрабатываемую деталь, и повышение ее твердости обусловлено соответствующей величиной действующего давления.

Степень наклепа по известной формуле

$$U_H = \frac{HB - HB_0}{HB_0} \quad (11)$$

представляет собой приращение твердости  $\Delta HB = HB - HB_0$ , которое должно быть коррелировано с приращением деформирующего напряжения относительно его условного предела текучести  $\Delta\sigma_T = \sigma_T - \sigma_{0,2}$ . По определению, стандартизованная величина  $\sigma_{0,2}$  обеспечивает после снятия нагрузки остаточную деформацию, равную 0,2%.

На основании проведенного анализа можно принять, что степень наклепа функционально определяется величиной деформирующего напряжения

$$U_H = f(p_0 - \sigma_{0,2}), \quad (12)$$

где  $p_0$  – величина действующего на поверхность детали напряжения при ППД.

Рассмотрим случай упрочнения пластичного металла, кривая деформация – напряжение которого представлена выше. Тогда в соответствии с обозначением действующей нагрузки через  $p_0$ , которая принята в расчетах выглаживания, степень наклепа упрочненной поверхности может быть рассчитана как

$$U_H = \frac{p_0 - \sigma_{0,2}}{\sigma_{0,2}}. \quad (13)$$

Для пластичных металлов, например для стали 43, можно рассчитать величину  $p_0$  и на основе справочных сведений о величине услов-

ного предела текучести  $\sigma_{0,2}$  определить расчетную степень наклепа обработанной поверхности детали.

Ранее было сделано предложение о том, что для деталей автомобильного двигателя, работающего при высоких температурах нагрева, которые упрочняются выглаживанием, необходимо наложить ограничение по степени наклепа обработанной поверхности не более 8–10%.

Если принять это условие  $U_H \leq 0,10$ , то можно установить необходимую величину упрочняющего напряжения, при котором степень наклепа поверхности детали не выйдет за пределы заданной величины:

$$p_0 = (1 + U_H) \sigma_{0,2} \quad (14)$$

или

$$\sigma_{0,2} \leq p_0 \leq 1,1 \sigma_{0,2}. \quad (15)$$

По формуле (15) можно, таким образом, априорно оценить расчетную величину напряжения, необходимую для достижения заданной степени упрочнения не более 10%.

При упрочнении закаленных сталей и высокопрочного чугуна достигаемая степень упрочнения обработанной поверхности детали может определяться по изменению ее микротвердости:

$$U_H = \frac{HRC - HRC_0}{HRC_0}. \quad (16)$$

Аналогично (7) получаем соотношение

$$\sigma(HRC_0) \leq p_0 \leq 1,1 \sigma(HRC_0), \quad (17)$$

в котором количественная оценка величины  $\sigma(HRC_0)$  неизвестна. В некоторых работах приводятся расчетные значения для напряжения в зависимости от величины только твердости HB (7), (8), (9) и (10), а не микротвердости HV или HRC.

У Г.Д. Деля имеется экспериментальное подтверждение существования зависимости интенсивность напряжений  $\sigma$  – микротвердость по Виккерсу HV, которая выявлена по кривым упрочнения. Однако для практических целей он рекомендует тарифовочные графики  $\sigma$  – HV по результатам испытания материала на деформацию (включая сжатие, например), на различную её степень.

При контактном взаимодействии в условиях выглаживания, когда в шероховатую поверхность детали внедряется индентор в виде сферы или цилиндра, действующее напряжение пропорционально нагрузке Q

и обратно пропорционально глубине внедрения  $\delta$ . Величина  $\delta$  обычно устанавливается опытным путем и, следовательно, до экспериментов связь, например,  $p_0(Q)$ , невозможно точно прогнозировать, так как величина нагрузки на выглаживатель должна также определяться по результатам экспериментальных исследований.

Для априорной расчетной оценки напряжения, необходимого для реализации отделочного эффекта при выглаживании, надо воспользоваться заданным изменением шероховатости обрабатываемой поверхности детали.

Известно, что стандартизованная характеристика микронеровностей на поверхности включает много параметров, основными из которых являются параметры  $R_a$  – среднее арифметическое отклонение профиля и  $R_z$  – высота неровностей профиля по десяти точкам.

Назначение выглаживания – это уменьшение исходной шероховатости поверхности до заданных её параметров. Поэтому для уменьшения параметра шероховатости  $R_z$  от начального значения до заданного можно обеспечить только соответствующим внедрением индентора на глубину  $\delta$  (рис. 16)

$$\delta = R_z^{исх} - R_z^{зад} \quad (18)$$

Изменение параметра шероховатости  $R_z$  в связи с увеличением  $\delta$  наиболее соответствует механизму отделочно-упрочняющей обработки за счет сглаживания микронеровностей на обрабатываемой поверхности детали рабочей поверхностью выглаживателя.

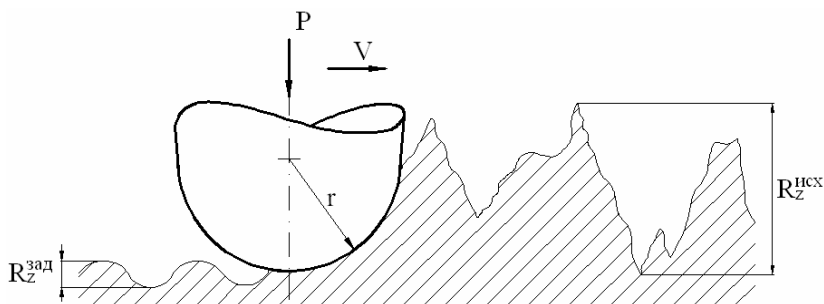


Рис. 16. Схема выглаживания микронеровностей

Параметр  $R_z$  часто является назначаемой характеристикой шероховатости обрабатываемой поверхности. С другой стороны, между параметрами  $R_a$  и  $R_z$  существует прямая пропорциональная зависимость. В случае, если при проектировании техпроцесса ППД необходимо обеспечить уменьшение величины  $R_a$ , то рассчитать необходимую величину можно по простой формуле

$$R_z = 5 R_a. \quad (19)$$

Задаваясь величиной  $\delta$  по условию (18), можно по формулам соответственно для выглаживания широким инструментом и алмазным наконечником определить величину упрочняющей нагрузки.

В результате для расчета усилия выглаживания  $P$  имеются ограничения по глубине внедрения выглаживателя в обработанную поверхность детали  $\delta$  (18) и величине действующего напряжения деформирования (15) и (17).

### **Контрольные вопросы**

1. Как влияет твердость на предел текучести и сжатия?
2. Какова связь действующего напряжения и нагрузки?
3. Чем обусловлено изменение шероховатости при различной глубине внедрения выглаживателя при обработке?

## 7. УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА ИНСТРУМЕНТАМИ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В машиностроении для обработки деталей методом выглаживания применяются различные виды выглаживателей, отличающихся друг от друга материалом и формой рабочей части. Поскольку силы, возникающие в процессе выглаживания, создают большие контактные давления на рабочей поверхности инструмента, к его материалу предъявляются следующие требования:

- большая твердость;
- способность сопротивляться истиранию;
- высокий предел прочности на сжатие;
- низкий коэффициент трения по металлу;
- большая теплопроводность и теплоемкость.

Всем этим требованиям в наилучшей степени удовлетворяет природный алмаз. Однако, несмотря на многие преимущества алмазного выглаживания, этот процесс имеет ограниченное применение в металлообработке из-за высокой стоимости и повышенной хрупкости алмаза. Поэтому для изготовления выглаживающего инструмента необходимо изыскивать более дешевые и легкообрабатываемые инструментальные материалы, заменяющие алмаз, без снижения качественных показателей процесса выглаживания. В трудах многих ученых был изучен ряд инструментальных материалов, используемых при изготовлении выглаживающего инструмента (рис. 17).

Для изготовления алмазных выглаживателей используют природный алмаз, а также в целях снижения стоимости обработки в некоторых случаях природный алмаз заменяют синтетическим. Синтетические алмазы с размером зерна более 3 мм в виде поликристаллов получили название баллас (АСБ) или карбонадо (АСПК) по аналогии с наименованиями соответствующих природных алмазов. Особенность их структуры обеспечивает изотропность физико-механических свойств, что дает возможность инструменту работать с переменными нагрузками. Алмазы АСБ имеют шаровидную форму с четко выраженной радиально-лучистой структурой, размеры их зерен достигают 6 мм, алмазы АСПК имеют форму цилиндра диаметром 2–4,5 мм и высотой 2–5 мм. Структура их также радиально-лучистая, но более совершенная.



Рис. 17. Материалы, используемые при изготовлении шлифователей

Испытания на стойкость алмазных шлифователей производились многими исследователями, наиболее полные исследования износостойкости выполнены Э.Г. Грановским.

В работах В.К. Яценко<sup>7</sup> и А.П. Мосталыгина<sup>8</sup> показан успешный опыт применения инструментов из синтетических алмазов АСПК при вибровыглаживании закаленных сталей.

Предлагается применить в качестве инструментального материала минералокерамику (марки В-3 и ВСК-60). Результаты проведен-

<sup>7</sup> Яценко В.К., Зайцев Г.З., Притченко В.Ф., Ившенко Л.И. Повышение несущей способности деталей машин алмазным выглаживанием. М.: Машиностроение 1985. – 232 с.

<sup>8</sup> Мосталыгин Г.П., Мосталыгин А.Г. Перспективы совершенствования технологических процессов автоматизированного производства на основе применения операций выглаживания минералокерамическим инструментом // Вестник Курганского государственного университета (Серия: Технические науки). 2007. № 9. – С. 130–132.

ных опытов показали, что интенсивность износа поверхности выглаженных образцов в 1,6–4,9 раза меньше интенсивности износа после чистового точения. Благоприятный микрорельеф выглаженной поверхности резко уменьшает износ приработки. Выглаживание гладких образцов повышает предел выносливости на 18–20%, а образцов с надрезом – на 22–38%.

Кроме минералокерамики применяют выглаживатели с пластинами из твердого сплава. При оптимальных геометрических параметрах и выгодных условиях обработки (обильная смазка) процесс считается высокопроизводительным. При изготовлении широких выглаживателей в массовом производстве использование в качестве инструментального материала твердых сплавов позволяет существенно снизить затраты на обработку. Исследования, проведенные в лаборатории технологии машиностроения Воронежского политехнического института, и опыт других исследователей показывают, что механическое выглаживание деталей твердосплавными пластинками является одним из путей решения многих вопросов надежности, долговечности и производительности. Выглаживанию подвергались образцы цилиндрической формы из термически не обработанных сталей 45 и 40Х. Режимы выглаживания изменялись в таких пределах: подача  $s = 0,05–0,5$  мм/об; скорость выглаживания  $v = 16–160$  м/мин; число проходов  $i = 1–8$ . Выглаживание велось пластинками из твердых сплавов ВК8, Т15К6 (ГОСТ 3882–61 и ГОСТ 2209–55), минералокерамическими пластинами типа ЦМ432. Испытания показали, что при обработке твердосплавными пластинами твердость поверхностного слоя возросла в 1,6–2 раза, в то время как сердцевина осталась мягкой. Износостойкость выглаженных образцов в 1,5–2 раза выше шлифованных.

Наиболее полно твердые сплавы в качестве материалов для изготовления выглаживателей исследованы в работе Г.П. Башкова<sup>9</sup>, в которой изучен ряд инструментальных материалов: титанокобальтовые – ТЗОК4, Т15К6, Т14К8, Т5КЮ, вольфрамкобальтовые – ВК2, ВК3М, ВК4, ВК6М, ВК8 и титанотанталокобальтовые твердые сплавы – ТТ10К8А, ТТ10К8Б. Для выбора оптимальной марки инструмента были приняты следующие режимы обработки: сила выглаживания

---

<sup>9</sup> Башков Г.П. Выглаживание восстановленных деталей. М. : Машиностроение, 1979. – 80 с.



$P = 700$  Н, скорость обработки  $v = 2$  м/с, подача  $s = 0,2$  мм/об, радиус выглаживателей  $R = 4$  мм, угол установки выглаживателя  $\alpha = 0^\circ$  (перпендикулярно подаче), исходная шероховатость обрабатываемой поверхности  $R_a = 1,0$  мкм. Для ускоренного определения стойкости выглаживателей в одном месте контакта инструмента и детали были назначены жесткие режимы выглаживания (без применения СОТС). В качестве критерия стойкости выглаживателей было принято увеличение шероховатости обработанной поверхности после выглаживания. Данные о стойкости инструментальных материалов (мин, м) при выглаживании наплавки под слоем легирующего флюса АН-348А как наиболее высокопрочного металлопокрытия приведены ниже (табл. 3).

Таблица 3

Стойкость выглаживающих инструментов из твердых сплавов

Наименование сплавов	Стойкость, мин	Стойкость, м
Титановольфрамовый		
Т30К4	3,05	366
Т15К6	1,99	238,8
Т14К8	1,34	160,8
Т5К10	0,85	102
Вольфрамокобальтовый		
ВК2	1,58	189,6
ВК3М	0,97	116,4
ВК4	1,27	152,4
ВК6	0,80	96
ВК6М	0,78	93,6
ВК8	0,72	86,4
Титанотанталовольфрамовый		
ТТ10К8А	0,82	98,4
ТТ10К8Б	1,22	146,4

Среди испытываемых инструментальных материалов максимальную стойкость показал твердый сплав Т30К4. Его стойкость в 3–4 раза выше стойкости сплавов Т5КЮ, ВК3М, ВК.6, ВК.6М, ВК8, ТТ10К8А.

У твердых сплавов группы ТК стойкость гладилки повышается при увеличении процентного содержания карбидов титана с понижением процентного содержания кобальта. Это связано с тем, что микротвердость карбидов титана значительно выше, чем карбидов вольфрама. Применение при выглаживании инструментов из титановых твердых

сплавов эффективнее, чем из вольфрамокобальтовых из-за их высокой теплостойкости и меньшего коэффициента трения.

У твердых сплавов группы ВК стойкость гладилок повышается при понижении процентного содержания кобальта (аналогично твердым сплавам группы ТК), причем эти сплавы обладают наибольшей схватываемостью с покрытием. Влияние величины зерна основных карбидов и твердых сплавов ВК6 и ВК6М сказывается незначительно. Самый износостойкий среди вольфрамокобальтовых твердых сплавов ВК2 имеет стойкость в 2 раза ниже стойкости твердого сплава ТЗОК4. Поэтому при выглаживании восстановленных деталей не рекомендуется применять в качестве инструментальных материалов сплавы группы ВК.

Стойкость гладилок, изготовленных из твердого сплава ТТ10К8Б, несколько выше, чем из сплава ТТ10К8А. Это объясняется тем, что при одинаковом содержании кобальта и карбидов вольфрама твердый сплав ТТ10К8Б имеет повышенное содержание карбидов тантала (7% против 3% у сплава ТТ10К8А). При использовании твердых сплавов группы ТТК необходима высокая жесткость системы СПИД, стоимость их значительно выше стоимости твердых сплавов других групп, поэтому эти сплавы при выглаживании непригодны.

В работе Ю.Г. Проскурякова<sup>10</sup> рассмотрены твердосплавные раскатки (ВК8) для обработки отверстий. Раскатки получили распространение при обработке деталей из цветных металлов на медной и алюминиевой основе, т. е. на материалах, которые исключают налипание металла на деформирующих элементах раскатки. При обработке отверстий этим инструментом обеспечивается точность обработки 1–2 класса и шероховатость поверхности 9–11 класса.

Следует отметить, что структура твердых сплавов и химический состав входящих компонентов постоянно совершенствуются. В области структуры основной тенденцией является уменьшение зерна твердосплавного порошка. За прошедшие несколько лет размер зерна твердого сплава уменьшился более чем в пять раз (рис. 18).

---

<sup>10</sup> Проскуряков Ю.Г., Осколков А.И., Шаповалов Б.Г., Усиков И.К. Чистовая обработка деталей пластическим деформированием. Барнаул : Алт. кн. изд-во, 1969. – 105 с.

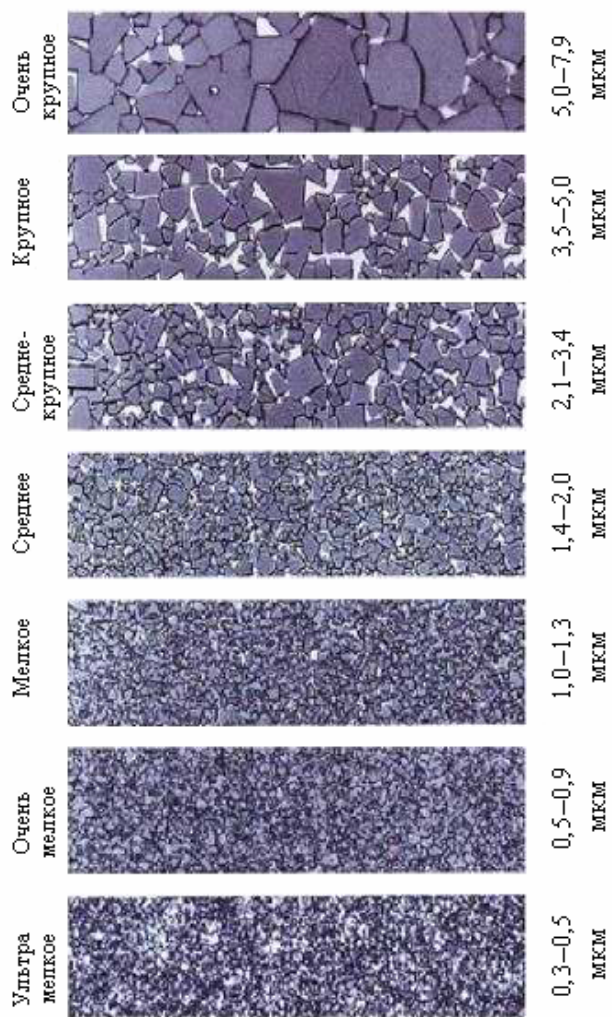


Рис. 18. Размер зерна твердого сплава

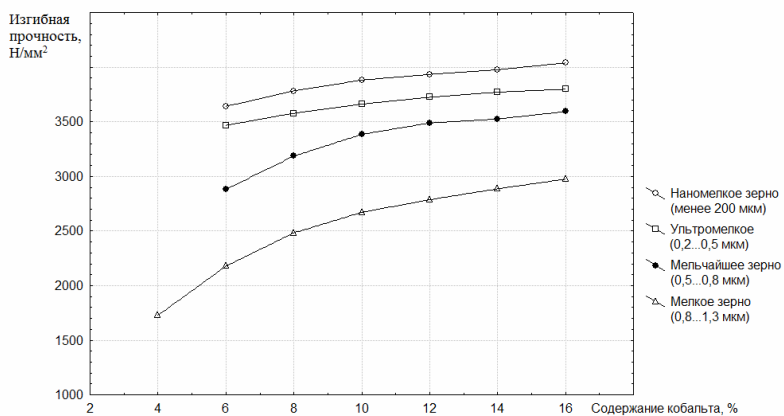
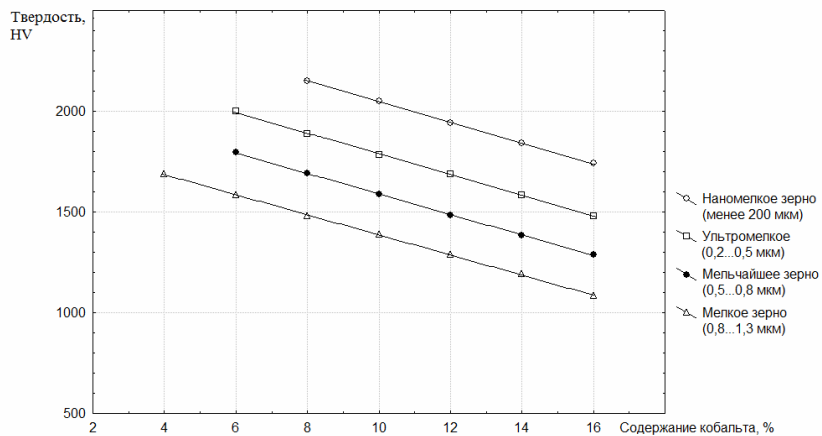


Рис. 19. Свойства мелкозернистых твердых сплавов

В результате уменьшения размера зерна существенно повышаются технологические свойства твердого сплава, в первую очередь твердость и изгибная прочность (вязкость сплава) (рис. 19). Увеличение изгибной прочности повышает прочность выглаживающей кромки, в результате уменьшается износ, вызванный истиранием.

В работе Л.А. Хворостухина<sup>11</sup> сделан анализ эффективности применения различных инструментальных материалов по таким критериям, как трение и налипание материала на индентор.

Рубином и сапфиром выглаживали следующие материалы: красную медь, Д16Т, АК-6 с анодированным покрытием, а также стали 30, 38ХМЮА, 12Х18Н2АГ5, 13Х12НВМФА и 30ХГСА. Налипание материала на индентор происходило при выглаживании сталей с меньшей твердостью, на рабочей поверхности корундового инструмента налип образуется быстрее. Если брать за критерий выбора инструмента коэффициент трения, то природные жесткие алмазы предпочтительнее, чем синтетические АСБ и АСПК, поскольку в первом случае коэффициент трения в 2,5–4 раза ниже при одинаковых радиусах индентора.

Таким образом, исходя из экономической эффективности, а также технологического процесса изготовления широких выглаживателей наиболее целесообразным оказалось использование инструментов с рабочей поверхностью из твердого сплава.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие требования предъявляются к материалам для выглаживающего инструмента?
2. Какие природные материалы используются при обработке ППД?
3. Как влияет применение твердого сплава в качестве выглаживающего материала на характеристики инструмента?

---

<sup>11</sup> Хворостухин Л.А., Шишкин С.В., Ковалёв А.П., Ишмаков Р.А. Повышение несущей способности деталей машин поверхностным упрочнением. М. : Машиностроение, 1988. — 144 с.

## Библиографический список

1. Ардашинков, Б.Н. Исследование влияния шероховатости и наклепа на износостойкость / Б.Н. Ардашинков, Ю.Р. Витенберг // Технологические методы повышения качества поверхности деталей машин. – Л., 1978. – С. 162–167.
2. Безъязычный, В.Ф. Технологические процессы механической и физико-химической обработки в авиадвигателестроении : учеб. пособие для студ. вузов, обучающихся по спец. «Авиационные двигатели и энергетические установки» направления подготовки дипломированных специалистов «Двигатели летательных аппаратов» / В.Ф. Безъязычный. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Машиностроение, 2007. – 538 с.
3. Технология обработки деталей поверхностно-пластическим деформированием без применения смазывающе-охлаждающих технологических средств / Н.М. Бобровский [и др.]. – Самара : Самарский НЦ РАН, 2012. – 142 с.
4. Бурке, Д. Обработка поверхности и надежность материалов / Д. Бурке, Ф. Вайс. – М. : Мир, 1984. – 192 с.
5. Дель, Г.Д. Технологическая механика / Г.Д. Дель. – М. : Машиностроение, 1978. – 174 с.
6. Кан, Р. Физическое металловедение / Р. Кан. – М. : Мир, 1968. – 484 с.
7. Крагельский, И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский. – М. : Машиностроение, 1968.
8. Кроха, В.А. Кривые упрочнения металлов при холодной деформации / В.А. Кроха. – М. : Машиностроение, 1968. – 131 с.
9. Мельников, П.А. Повышение эксплуатационных свойств сальниковых шеек коленчатых валов путем оптимизации технологии изготовления / П.А. Мельников, А.С. Селиванов, Л.Р. Хамидуллова // Объединенный научный журнал. – 2003. – № 29. – С. 15–17.
10. Нежинский, А.М. Повышение качества и производительности изготовления деталей машин / А.М. Нежинский. – Курган, 1995.
11. Одинцов, Л.Г. Финишная обработка деталей алмазным выглаживанием и вибровыглаживанием / Л.Г. Одинцов. – М. : Машиностроение, 1981. – 160 с.

12. Орлов, А.В. Остаточные деформации при контактном нагружении / А.В. Орлов, С.В. Пинегин. – М. : Наука, 1971. – 62 с.
13. Папшев, Д.Д. Упрочнение деталей обкаткой шариком / Д.Д. Папшев. – М. : Машиностроение, 1968. – 131 с.
14. Смелянский, В.М. Механика упрочнения поверхностного слоя деталей машин в технологических процессах поверхностного пластического деформирования / В.М. Смелянский. – М. : МАШМИР, 1992. – 58 с.
15. Сулима, А.М. Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных и титановых сплавов / А.М. Сулима, М.И. Евстигнеев. – М. : Машиностроение, 1974. – 253 с.
16. Сулима, А.М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / А.М. Сулима, В.А. Шулов, Ю.Д. Ягодкин. – М. : Машиностроение, 1988. – 240 с.
17. Суслов, А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей / А.Г. Суслов. – М. : Машиностроение, 1987. – 208 с.
18. Суслов, А.Г. Научные основы технологии машиностроения / А.Г. Суслов, А.М. Дальский. – М. : Машиностроение, 2002. – 684 с.
19. Торбило, В.М. Алмазное выглаживание / В.М. Торбило. – М. : Машиностроение, 1972. – 104 с.
20. Школьник, Л.М. Технология и приспособления для упрочнения и отделки деталей накатыванием / Л.М. Школьник, В.И. Шахов. – М. : Машиностроение, 1964. – 183 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1. ФИЗИКА ПРОЦЕССА И ОБЗОР СПОСОБОВ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТНО-ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ.....	4
2. ВЛИЯНИЕ МЕТОДОВ ППД НА ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ.....	29
3. ФЕНОМЕНОЛОГИЯ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ.....	33
4. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ППД ОБКАТЫВАНИЕМ И ВЫГЛАЖИВАНИЕМ.....	39
5. УСТОЙЧИВОСТЬ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ДЕТАЛЕЙ.....	55
6. СВЯЗЬ МЕЖДУ ТВЕРДОСТЬЮ УПРОЧНЯЕМОГО МАТЕРИАЛА И НАПРЯЖЕНИЕМ ЕГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ.....	61
7. УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА ИНСТРУМЕНТАМИ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	69
Библиографический список.....	77



Учебное издание

*Бобровский Николай Михайлович*

*Бобровский Игорь Николаевич*

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН  
ПОВЕРХНОСТНО-ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

Учебное пособие

Редактор *Т.Д. Савенкова*

Технический редактор *З.М. Малявина*

Вёрстка: *Л.В. Сызганцева*

Дизайн обложки: *Г.В. Карасева*

Подписано в печать 07.10.2013. Формат 60×84/16.

Печать оперативная. Усл. п. л. 4,65.

Тираж 50 экз. Заказ № 1-02-13.

Издательство Тольяттинского государственного университета  
445667, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14

