

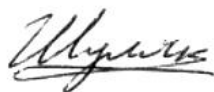
На правах рукописи
УДК 621.9

Шуляк Ян Игоревич

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА ДЕФОРМАЦИОННОГО
УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ
ДЕФОРМИРУЮЩЕГО РЕЗАНИЯ

Специальность:
05.02.07 - Технология и оборудование механической и
физико-технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном
образовательном учреждении высшего образования
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Научный руководитель:

Сергей Геннадьевич Васильев,
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Саушкин Борис Петрович,
доктор технических наук, профессор кафедры
технологий и оборудования машиностроения
Московского политехнического университета

Андреев Виктор Николаевич,
кандидат технических наук,
заведующий лабораторией резания металлов
ОАО «ВНИИИНСТРУМЕНТ»

Ведущая организация – ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН»

Защита состоится «___» _____ 20___ г. в _____ час. на
заседании диссертационного совета Д 212.141.06 при МГТУ им. Н.Э. Баумана
по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр.1.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью
организации, просим направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ
им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.
Телефон для справок: 8(499)267-09-63.

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета
д.т.н., доцент



В.П. Михайлов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В машиностроении широко известна проблема повышения параметров износостойкости поверхностей трения скольжения. Для ее решения используется множество методов поверхностного упрочнения. Каждый из методов обладает своими преимуществами и недостатками. В большинстве случаев упрочнение материала обеспечивается изменением его химического состава, проведением структурных и фазовых превращений, изменением плотности дислокаций при пластическом деформировании и другими способами. Среди используемых методов упрочнения часто используются методы поверхностного пластического деформирования (ППД), основанные на эффекте деформационного упрочнения материала. Обработка методами ППД для создания упрочненного поверхностного слоя на деталях менее энергозатратна по сравнению с термическими и химико-термическими способами упрочняющей поверхностной обработки, что делает методы ППД актуальными для поверхностного упрочнения сталей и незакаливаемых сплавов. К основным недостаткам существующих методов ППД относятся малая глубина упрочнения, неравномерное распределение твердости по толщине упрочненного слоя, использование сборных дорогостоящих приспособлений, необходимость предварительного экспериментального подбора оптимальных режимов обработки. Наличие существующих недостатков делает актуальным поиск и разработку новых способов поверхностного упрочнения.

Перспективным способом поверхностного упрочнения, позволяющим создавать упрочненный слой на поверхности заготовки, является метод деформирующего резания (ДР), разработанный на кафедре инструментальной техники и технологий МГТУ им. Н.Э Баумана. Метод защищен патентом РФ № 2044606, в котором сформулирована идея использования метода ДР как способа поверхностного упрочнения.

Метод ДР относится к способам лезвийно-деформирующей обработки и позволяет без отделения стружки формировать на поверхности детали макрорельеф из чередующихся выступов и впадин. Метод реализуется по различным кинематическим схемам обработки, включающим точение, строгание и фрезерование, на станках соответствующих групп. Отличие режущей части инструмента для ДР заключается в наличии деформирующей кромки, исключаяющей процесс резания на ней, вместо вспомогательной режущей кромки. Передний угол на деформирующей кромке имеет значительные отрицательные значения, что препятствует отделению стружки от заготовки. Режущая кромка разделяет припуск заготовки на слои, которые скользят по передней поверхности инструмента и перегибаются через деформирующую кромку. Подрезаемые слои обрабатываемого материала образуют на наружной поверхности детали совокупность чередующихся ребер, которую называют оребрением. Полученные ребра, по сути, являются не отделившейся от заготовки стружкой. Материал подрезаемого слоя при формировании ребра претерпевает значительные пластические деформации, характерные для стружки при обработке резанием, и упрочняется. Таким образом, получаемое методом ДР оребрение можно рассматри-

вать как упрочненный поверхностный слой с толщиной равной высоте получаемых ребер. Эффект повышения твердости формируемого макрорельефа обосновывает использование метода ДР как способа создания упрочненного поверхностного слоя на поверхности детали методом механической обработки с использованием лезвийно-деформирующего инструмента.

Преимуществами формирования упрочненного слоя методом ДР перед методами ППД является отсутствие падения твердости по глубине упрочненного слоя, использование простого по конструкции инструмента и универсального оборудования. По производительности метод ДР сопоставим с однопроходным накатыванием и алмазным выглаживанием и превосходит многопроходную обработку этими методами. Данные преимущества метода ДР делают актуальным его применение на практике для повышения твердости поверхностей деталей.

Для использования метода ДР при формировании упрочненного слоя актуальной задачей является разработка математической модели, позволяющей производить расчет твердости и глубины получаемого упрочненного слоя, а также обоснованно подходить к выбору режимов ДР и геометрических параметров инструмента.

Цель и задачи работы. Целью работы является повышение эксплуатационных характеристик деталей трения путем деформационного упрочнения их поверхностного слоя с использованием деформирующего резания.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- выполнить обзор методов деформационного упрочнения наружных поверхностей деталей,
- провести анализ метода ДР как способа формирования деформационноупрочненного макрорельефа на поверхности детали,
- разработать расчетную методику определения твердости упрочненного макрорельефа, получаемого методом ДР,
- экспериментально подтвердить результаты теоретического расчета твердости упрочненного макрорельефа, получаемого методом ДР,
- исследовать распределения твердости в характерных зонах упрочненного макрорельефа,
- определить влияния геометрических параметров инструмента и режимов ДР на твердость формируемого макрорельефа.
- подтвердить повышение износостойкости упрочненных поверхностей, созданных методом ДР,
- разработать рекомендации по практическому использованию предлагаемого способа упрочнения.

Методы исследования и достоверность. Для решения поставленных задач в работе использовались теоретические и экспериментальные методы исследования. Построение теоретической модели расчета твердости материала макрорельефа, формируемого методом ДР, осуществлялось с использованием метода пластического течения, разработанного профессором А.Л. Воронцовым. Математическое описание геометрии режущего инструмента ДР выполнялось

на основе положений аналитической геометрии. Результаты теоретических исследований базируются на фундаментальных основах теории пластичности и подтверждаются результатами исследований.

Экспериментальные исследования проводились по проверенным методикам с использованием комплекса современного измерительного оборудования в лаборатории кафедры инструментальной техники и технологий МГТУ им. Н.Э. Баумана. В процессе экспериментов использовались современные средства сбора и обработки данных. Измерения микротвердости макрорельефа осуществлялись на микротвердомере модели ПМТЗ, оснащенным цифровой фото-видеокамерой модели Levenhuk C510. Испытания на трение и износ проводились на машине трения Amsler A135, модернизированной с участием автора для автоматизации сбора и обработки данных.

Научная новизна. Обосновано использование деформирующего резания для поверхностного деформационного упрочнения деталей машин. Совокупность подрезанных, пластически деформированных, регулярно расположенных ребер, сохранивших прочную связь с обработанной заготовкой, образует упрочненный слой с повышенной твердостью, износостойкостью и глубиной.

На основе положений теории пластичности установлена математическая зависимость твердости упрочненного поверхностного слоя от геометрических параметров инструмента и режимов деформирующего резания. Доказано, что деформационное упрочнение происходит в трех зонах: в зоне основных сдвиговых деформаций в области режущей кромки, зоне изгибных деформаций в области деформирующей кромки и зоне изгибных деформаций подрезанного слоя в его основании. Установлено, что основным параметром, влияющим на твердость упрочненного слоя, является величина накопленной деформации.

Выявлены закономерности распределения микротвердости по толщине упрочненного макрорельефа на сталях феррито-перлитного и аустенитного классов.

Доказано, что упрочняющая обработка методом ДР позволяет достичь сопоставимое с алмазным выглаживанием повышение износостойкости при большей толщине упрочненного слоя и равномерном распределении твердости по его толщине.

Практическая значимость работы. Разработан способ поверхностного деформационного упрочнения на основе метода деформирующего резания, обеспечивающий равномерное распределение твердости при повышенной глубине упрочнения.

Разработана методика расчета, позволяющая прогнозировать параметры упрочненного слоя.

Определены геометрические параметры инструмента и режимы ДР для получения упрочненной поверхности с заданными параметрами глубины и твердости.

Положения, выносимые на защиту. Методика теоретического расчета твердости упрочненного слоя, получаемого методом ДР.

Результаты экспериментального исследования распределения микротвердости в материале упрочненного макрорельефа, формируемого методом ДР на сталях 30ХГСА, 38Х2МЮА, 12Х18Н10Т.

Результаты оценки износостойкости поверхностей трения, упрочненных методом ДР.

Практические рекомендации по поверхностному упрочнению деталей типа вал.

Реализация работы. Результаты работы использованы при выполнении НИР «Разработка принципов целенаправленного изменения эксплуатационных свойств поверхностей деталей методами глубинного механического воздействия», шифр темы 1.23.09 (ТП4), НИР «Разработка технологий и средств технологического оснащения для обеспечения производства судового оборудования в Северо-Западном регионе России», шифр темы «Механизм» и в учебном процессе кафедры инструментальной техники и технологий при проведении занятий по дисциплине «Спецглавы механической и физико-технической обработки» для студентов специальности 15.05.01_02 «Проектирование технологических машин и комплексов – Проектирование механообрабатывающих и инструментальных комплексов в машиностроении»

Апробация работы. Результаты работы были представлены и обсуждались на следующих мероприятиях:

- 4-я Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России», МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Москва, 2011 г.).
- 19-я Научно-Техническая Конференция молодых ученых и специалистов, посвященная 50-летию полета в космос Ю.А. Гагарина, ОАО РКК «Энергия», (г. Королев, 2011 г.).
- Международная молодежная конференция «Инновации в машиностроении», Юргинский технологический институт (г. Томск, 2012 г.)
- Молодежная научно-инженерная выставка «Политехника», МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Москва, 2012 г.).
- 9-я Всероссийская молодежная научно-инженерная выставка «Политехника», МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Москва, 2014 г.). Получен диплом первой степени в номинации «Технология обработки материалов».
- Семинар «Прогрессивные технологии термообработки и обработки металлов давлением», МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Москва, 2012г.).

Личный вклад. Выполнен теоретический расчет твердости упрочненного слоя, полученного методом ДР. Проведены экспериментальные исследования твердости упрочненного слоя, подтверждающие результаты теоретического расчета. Разработана методика и проведены триботехнические испытания на трение и износ образцов упрочненных методом ДР. Модернизирована машина трения типа «Amsler» для испытаний на трение и износ совместно с аспирантом Попцовым В.В.

Публикации. Материалы диссертации представлялись в 7 печатных изданиях и 2 рукописных публикациях, из них 3 статьи опубликовано в рекомендованных ВАК РФ рецензируемых журналах. Общий объем 4,98 п.л.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, общих выводов, списка использованной литературы из 101 наименований и приложений. Работа содержит 230 страниц, в том числе 182 основного текста, 106 рисунков, 46 таблиц, а также приложения на 32 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследований, приведены цель и задачи, научная новизна и практическая значимость работы, положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены механизмы деформационного упрочнения металлов и сплавов, выполнен обзор методов поверхностного упрочнения, основанных на дислокационной теории упрочнения, где повышение твердости и прочности материалов при их пластическом деформировании обусловлено увеличением плотности дислокаций кристаллической решетки материала. Литературный обзор показал, что степень упрочнения при пластическом деформировании зависит от структуры материала. По данным В.М. Браславского относительное увеличение твердости аустенитных сталей при обкатывании роликами достигает 100 %, ферритных — 90 %, феррито-перлитных — 60 %, а мартенситных — 52 %.

К часто применяемым в машиностроении аустенитным сталям относятся сталь марки 12X18H10T и ее близкие аналоги. Для изготовления валов и осей часто используют феррито-перлитные стали, марок 30ХГСА и 38Х2МЮА. Указанные марки сталей выбраны в силу их востребованности на практике и наличия у них структуры склонной к деформационному упрочнению.

К производительным методам ППД используемым для повышения твердости поверхностей трения валов и осей относятся накатывание и алмазное выглаживание. Недостатками данных методов являются применение сборных приспособлений и инструментов, дополнительных пневматических и гидравлических устройств, необходимость контроля силы прижатия деформирующего элемента к заготовке, экспериментальный подбор и корректировка режимов обработки, неравномерное распределение твердости по толщине упрочненного слоя, возможность получения дефектов в форме шелушения поверхности, искривления оси заготовки.

Альтернативным методом получения упрочненного слоя на поверхности детали, устраняющим перечисленные недостатки является метод механической обработки деформирующим резанием. Обработка методом ДР осуществляется по токарной, строгальной или фрезерной схемам обработки на универсальном, специальном и специализированном металлорежущем оборудовании. При обработке методом ДР наружной цилиндрической поверхности заготовки по схеме точения (Рис. 1) инструмент ДР совершает прямолинейное движение подачи вдоль образующей вращающейся заготовки, совершающей главное движение

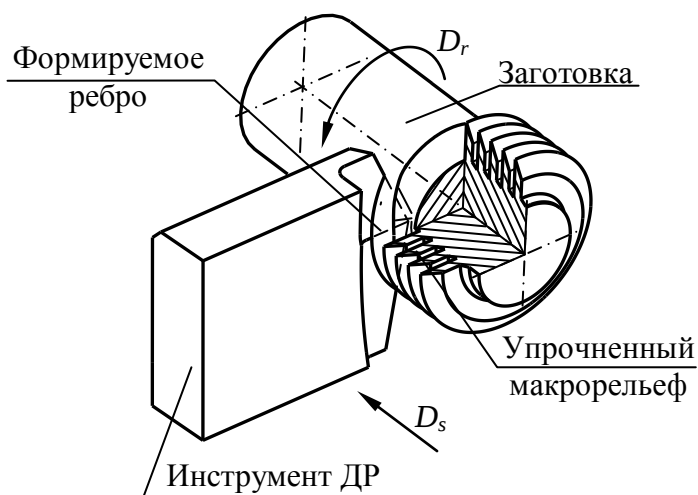


Рис. 1. Обработка методом ДР

резания. В процессе работы инструмента ДР его режущая кромка разделяет поверхностный слой обрабатываемой заготовки, образуя подрезаемый слой, прочно прикрепленный узкой стороной к обработанной поверхности (Рис. 2). Подрезаемый слой деформируется в очаге пластической деформации у режущей кромки и скользит по передней поверхности, после чего перегибается через деформирующую кромку, получая дополнительную деформацию. В

результате на обработанной поверхности формируется винтовое ребро повышенной твердости, которое по сути представляет собой не отделившуюся от заготовки стружку. Совокупность витков формируемого ребра образуют на поверхности заготовки упрочненный макрорельеф с повышенной твердостью.

В зависимости от геометрических параметров режущего инструмента можно получить два типа макрорельефа. При вспомогательном угле в плане ϕ_1 равном 90° формируются вертикальные ребра с зазорами (Рис. 3, а). Если главный угол в плане ϕ равен или больше вспомогательного угла в плане ϕ_1 , то формируются наклонные ребра без зазоров (Рис. 3, б).

На вершине формируемого ребра имеется треугольное заострение, которое должно быть удалено для формирования опорной поверхности (Рис. 3, в, г). Удаление треугольного заострения производится точением на той же операции после формирования упрочненного макрорельефа или на отдельной операции методом шлифования. При формировании вертикальных ребер с зазорами диаметр по вершинам ребер больше обрабатываемого диаметра, что позволяет осуществлять упрочнение материала с одновременным увеличением размеров

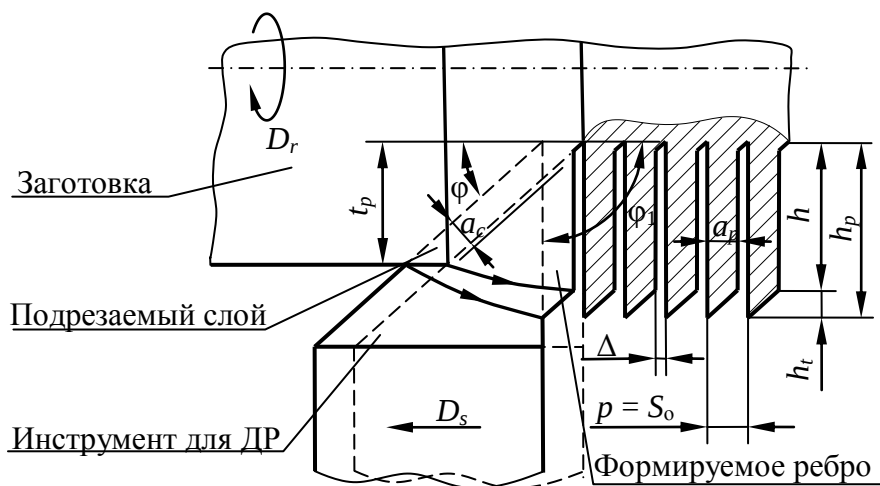


Рис. 2. Формирование макрорельефа, получаемого методом ДР.

для восстановления изношенной поверхности. Зазоры между ребрами могут быть использованы для удержания смазок или заполнения ремонтным составом. Наклонные ребра без зазоров позволяют получить опорную поверхность той же площади, что и исходная необработан-

ная методом ДР поверхность. В обоих случаях метод ДР формирует деформационноупрочненные слои.

Метод ДР имеет ряд преимуществ по сравнению с методами ППД. При обработке методом ДР используется простой по конструкции режущий инструмент, обработка осуществляется за один проход инструмента, упрочненный макрорельеф имеет равномерное распределение твердости по толщине упрочненного слоя. Высота и шаг ребер напрямую определяются геометрическими параметрами инструмента и режимами обработки, что позволяет прогнозировать толщину упрочненного слоя. Данные преимущества делают актуальным дальнейшее исследование и развитие метода ДР как способа формирования упрочненного поверхностного слоя на деталях.

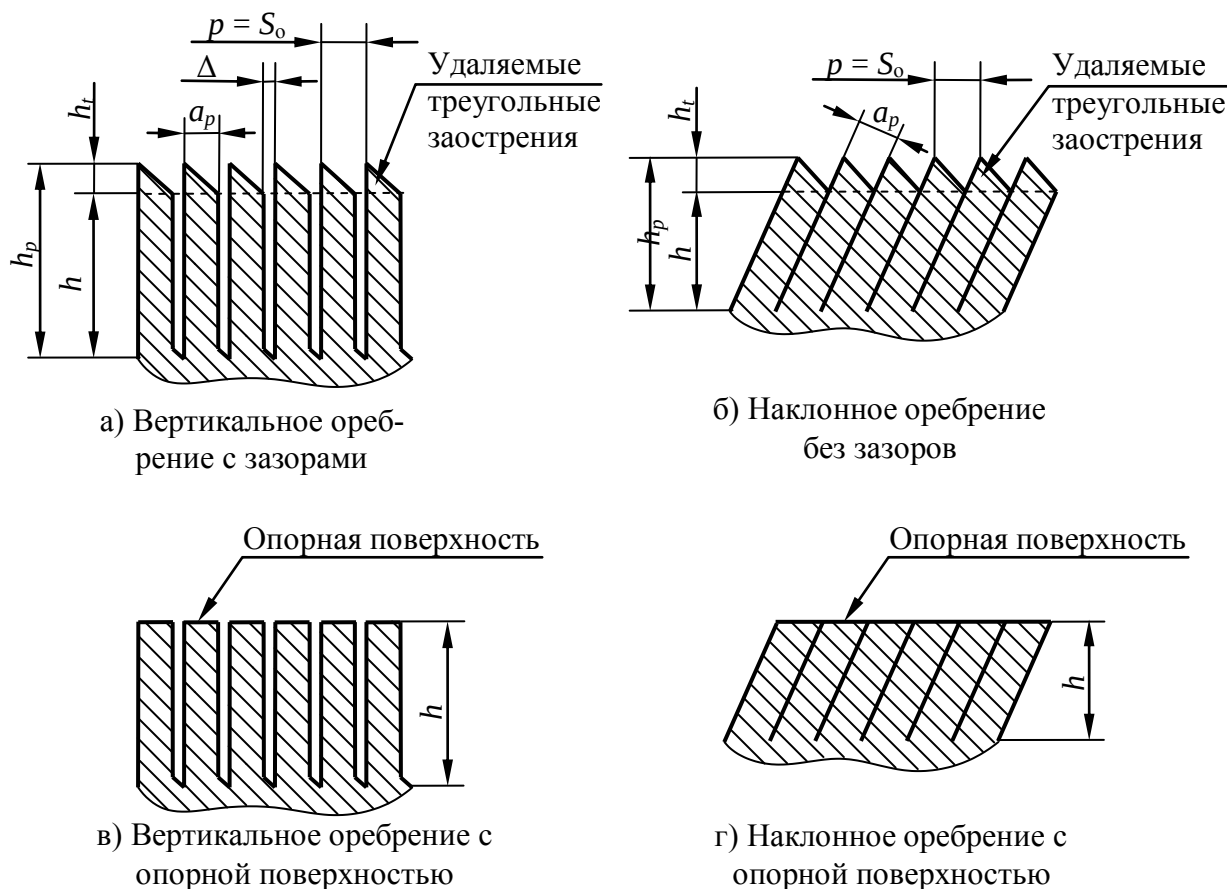


Рис. 3. Варианты упрочненного макрорельефа, получаемые методом ДР:
а, б – после ДР; в, г – после удаления вершин ребра

Однако, в настоящее время потенциальные возможности метода ДР по деформационному упрочнению не используются на практике в силу ряда причин. Отсутствуют экспериментальные данные, количественно оценивающие степень упрочнения применяемых на практике сталей и сплавов. Нет сравнительных испытаний на трение и износ упрочненных методом ДР поверхностей трения с поверхностями, упрочненными другими методами. Не выявлены закономерности, связывающие технологические параметры ДР и свойства получаемого упрочненного слоя.

Во второй главе рассмотрены методики исследования процесса ДР и макрорельефов, получаемых методом ДР, позволяющие повысить точность и достоверность проведенных экспериментальных исследований. Обработка методом ДР при получении образцов поверхностного макрорельефа проводилась на токарно-винторезном станке модели 16К20ПФ3. Режущие пластины инструмента для ДР изготавливались из пластин твердого сплава марок ВК8, Т14К8, Т5К10 формы 02411 по ГОСТ 25395-90. Экспериментальные исследования по формированию упрочненного макрорельефа проводились на сталях марок 30ХГСА, 38Х2МЮА, 08Х18Н10Т, 12Х18Н10Т. Выбранные марки сталей имеют структуры склонные к деформационному упрочнению.

Исследование микротвердости упрочненного макрорельефа, полученного методом ДР, проводилось на металлографических шлифах. Вырезка образцов для изготовления шлифов осуществлялась на вырезном электроэрозионном станке модели А207.61. Измерение микротвердости выполнялось по методу восстановленного отпечатка на микротвердомере модели ПМТ-3. Для повышения достоверности и точности измерений использовался микротвердомер, оснащенный цифровой фото-видеокамерой модели Levenhuk C510.

Разработана методика испытаний на трение и износ для исследования влияния упрочнения методом ДР на интенсивность изнашивания и коэффициент трения деталей пар трения скольжения. В результате работы проведена модернизация машины трения Amsler A135 совместно с Попцовым В.В. Автором выполнена модернизация механизма для измерения и регистрации коэффициента трения. В результате модернизации повышена точность регистрируемых экспериментальных данных. Разработанный стенд работает в режиме автоматизированного сбора и записи экспериментальных данных, что сокращает время на сбор и обработку результатов эксперимента. Измерение массового износа осуществлялось с использованием аналитических весов модели АДВ-200М 2 кл.

В третьей главе разработана математическая модель для определения твердости упрочненного слоя, получаемого методом ДР, с учетом геометрических параметров режущего инструмента, режимов резания, механических свойств обрабатываемого материала.

Математическая модель для определения микротвердости упрочненного материала ребра разработана с использованием метода решения пластических задач профессора А.Л. Воронцова. Метод базируется на основных положениях механики деформируемого твердого тела и имеет широкие возможности для расчета параметров напряженно-деформированного состояния в очаге пластической деформации и позволяет прогнозировать изменение механических свойств деформированного материала.

Твердость пластически деформированного материала зависит от его накопленной деформации ϵ_i . Функциональная зависимость твердости деформированного материала от параметра ϵ_i индивидуальна для каждого материала и в большинстве случаев определяется экспериментальным путем или по справочным данным. Решение задачи по определению твердости макрорельефа, упрочненного методом ДР, сводится к определению его накопленной деформации ϵ_i .

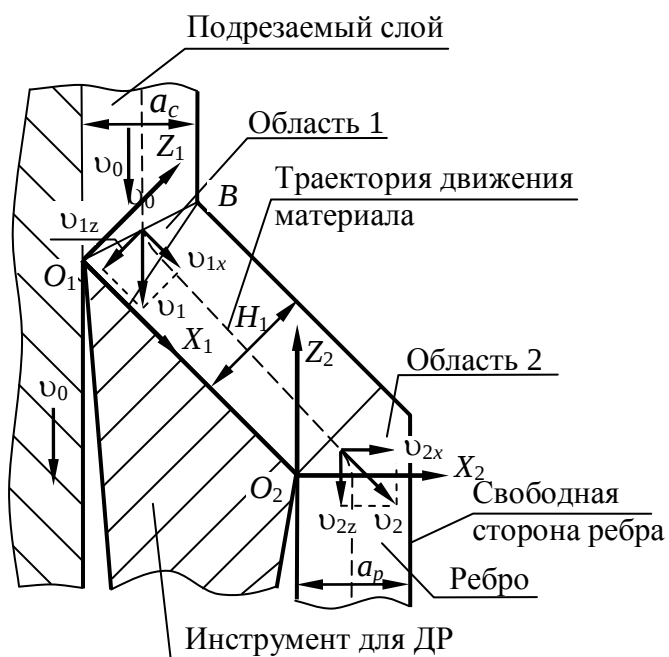


Рис. 4. Схема областей пластических деформаций

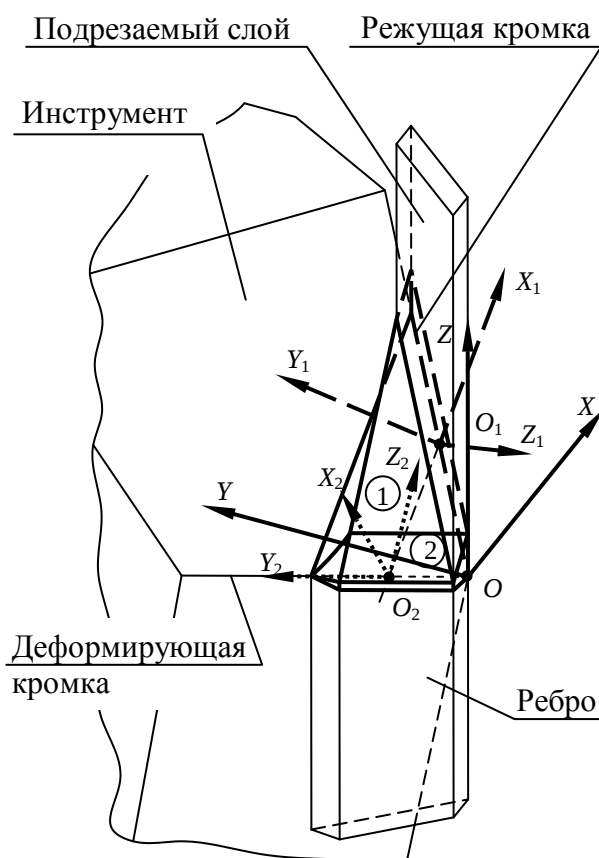


Рис. 5. Системы координат $O_1X_1Y_1Z_1$ и $O_2X_2Y_2Z_2$

Накопленная деформация e_i вычисляется, путем интегрирования функции интенсивности скоростей деформаций ξ_i по времени t , в течение которого деформируемый материал пребывает в очаге пластической деформации.

Для определения накопленной деформации e_i зона ДР разделилась на две области пластической деформации. Область 1 вдоль режущей кромки и область 2 вдоль деформирующей кромки (Рис. 4). В каждой из областей 1 и 2 относительно инструментальной системы координат $OXYZ$ задавались локальные системы координат $O_1X_1Y_1Z_1$ и $O_2X_2Y_2Z_2$ соответственно (Рис. 5). В областях 1 и 2 задавались скорости течения материала v_{1x} , v_{1y} , v_{1z} и v_{2x} , v_{2y} , v_{2z} соответственно, то есть линейные скорости движения элементарных объемов деформируемого материала вдоль осей локальных систем координат. Скорости течения материала задавались в виде функций соответствующих координат. Данные функции должны удовлетворять граничным условиям областей 1 и 2, условию постоянства объема деформированного материала и условию постоянства расхода материала через границы областей деформирования. Граничными условиями в области 1 приняты следующие условия. Скорость течения материала в направлении оси O_1Z_1 через границу между областью 1 и подрезаемым слоем равна проекции скорости резания на ось O_1Z_1 . Проекция скорости течения материала на ось O_1Z_1 в точках на передней поверхности инструмента равна ну-

лю. В области 2 приняты следующие граничные условия. На границе между областями 1 и 2 скорость течения материала вдоль оси O_2X_2 принимается равной величине v_{2Gx} , определяемой при последующем решении через равенство расходов материала, поступающего и покидающего область 2. Скорость течения материала вдоль оси O_2X_2 равна нулю в точках на свободной стороне формируемого ребра.

Одновременно с заданием скоростей течения материала определялись линейные и угловые скорости деформаций материала. Скорости течения и скорости деформаций связаны системой дифференциальных уравнений в частных производных так, что, зная функции скоростей течения, можно определить скорости деформаций. Системы координат в областях 1 и 2 введены таким образом, что течение материала вдоль осей O_1Y_1 и O_2Y_2 практически отсутствует, и материал в зоне деформации находится в плоскодеформированном состоянии. В данном случае линейные скорости деформации по осям O_1Y_1 и O_2Y_2 , и угловые скорости деформаций в плоскостях $O_1X_1Y_1$, $O_2X_2Y_2$, $O_1Y_1Z_1$, $O_2Y_2Z_2$ равны нулю. Эта особенность позволяет определить твердость упрочненного макрорельефа аналитическим способом.

Для определения накопленной деформации находят интенсивности скоростей деформаций в области 1 и области 2 соответственно. В результате проведенных преобразований получены выражения для интенсивностей скоростей деформаций в областях 1 ξ_{1i} и 2 ξ_{2i} :

$$\begin{cases} \xi_{1i} = -\frac{2\sqrt{3}}{3} \frac{v_{1A1z}}{H_1}, \\ \xi_{2i} = -\frac{2\sqrt{3}}{3} \frac{v_{2Gx}}{a_p}, \end{cases} \quad (1)$$

где v_{1A1z} – проекция линейной скорости течения материала на ось O_1Z_1 через границу между подрезаемым слоем на заготовке и областью 1; v_{2Gx} – проекция линейной скорости течения материала на ось O_2X_2 через границу области 1 и 2, которая определяется из равенства расходов материала, поступающего и покидающего область 2; H_1 – толщина области 1; a_p – ширина формируемого ребра в макрорельефе (Рис. 4). Скорости v_{1A1z} и v_{2Gx} имеют отрицательные значения, так как оси O_1Z_1 и O_2X_2 направлены против движения материала.

Для определения накопленной деформации материала найдено время течения деформированного материала в области пластической деформации. Для этого рассматривалось движение элементарного объема материала по траектории, проходящей через центр сформированного ребра. Исходя из функций скоростей течения материала, определялись уравнения движения рассматриваемого элементарного объема материала в областях 1 и 2 пластической деформации. Из полученных уравнений определялось время t_1 и t_2 прохождения элементарного объема через область 1 и 2 соответственно.

В результате интегрирования функций (1) интенсивностей скоростей деформаций ξ_{1i} и ξ_{2i} в областях 1 и 2 по времени получены выражения для определения накопленных деформаций e_{1i} и e_{2i} :

$$\begin{cases} e_{1i} = \xi_{1i} t_1, \\ e_{2i} = \xi_{2i} t_2. \end{cases} \quad (2)$$

В результате суммарная накопленная деформация $e_{i\Sigma}$, необходимая для расчета твердости деформированного материала имеет следующий вид:

$$e_{i\Sigma} = e_{Ii} + e_{III}. \quad (3)$$

Найденная суммарная накопленная деформация служит для определения твердости макрорельефа, получаемого методом ДР. Для проверки представленной методики расчета твердости были использованы литературные данные для сталей марок 12Х18Н10Т, 30ХГСА позволяющие установить связь между ее твердостью по шкале Бринелля и накопленной деформацией. Для сравнения с экспериментальными данными полученные значения твердости H_B по шкале Бринелля переводились в значения по шкале Виккерса H_V . Результаты расчета твердости материала макрорельефа, формируемого методом ДР, по представленной в работе методике близки к экспериментально измеренным значениям. Относительные отклонения Δ теоретически рассчитанных значений твердости $H_{V\text{теор}}$ от экспериментальных H_V не превышают $\pm 10\%$ (Таблица 1).

Таблица 1.

Твердость сталей, упрочненных методом ДР

Марка стали	t , мм	S_0 , мм/об	v_0 , м/с	e_i	$H_{V\text{теор}}$	$H_{V\text{эксп}}$	Δ , %
12Х18Н10Т	1,5	0,4	0,84	0,342	327	357	8,4
30ХГСА	0,75	0,4	1,26	0,348	337	310	-8,7

Полученная методика расчета твердости позволяет оценивать твердость и степень упрочнения материала теоретическим путем, что сокращает количество необходимых экспериментальных исследований.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований деформационноупрочненного макрорельефа, полученного методом ДР. Определялось распределение микротвердости по высоте и ширине ребра в зависимости от режимов обработки и геометрических параметров инструмента для ДР.

Серия экспериментов по определению распределения микротвердости по высоте формируемого макрорельефа проводилась на сталях марок 30ХГСА, 38Х2МЮА с использованием четырех вариантов геометрических параметров инструмента. Инструменты отличались соотношением углов φ и φ_1 при равенстве угла при вершине ε . При $\varphi = 38^\circ$ и $\varphi_1 = 90^\circ$ формировался макрорельеф с вертикальными ребрами и зазорами. При $\varphi = 62^\circ$ и $\varphi_1 = 66^\circ$ формировались наклонные ребра с минимальным зазором теоретически равным 12 мкм. Формируемое ребро не испытывало дополнительного силового воздействия со стороны деформирующей кромки. При $\varphi = 65^\circ$ и $\varphi_1 = 63^\circ$ возникало силовое воздействие со стороны деформирующей кромки инструмента, приводящее к дополнительному деформированию формируемого ребра. При $\varphi = 68^\circ$ и $\varphi_1 = 60^\circ$ силовое воздействие увеличивалось по отношению к предыдущему соотношению

φ и φ_1 . Дальнейшее увеличение силового контакта между инструментом и подрезаемым слоем не представлялось возможным, так как инструмент терял работоспособность в результате разрушения вершины. Режимы обработки методом ДР составляли: $t = 0,75$ мм, $S_0 = 0,4$ мм/об; $v_0 = 0,73..0,77$ м/с. Степень упрочнения материала оценивалась, как относительное увеличение микротвердости в процентах. Сравнение результатов производилось по среднему значению степени упрочнения, рассчитанному для разных областей формируемого ребра. Результаты измерений представлены в Таблице 2.

Таблица 2.

Средняя степень упрочнения по высоте ребра

Материал	Средняя степень упрочнения, %							
	сталь 30ХГСА исходная микротвердость 239 HV 0,1				сталь 38Х2МЮА исходная микротвердость 295 HV 0,1			
φ	38°	62°	65°	68°	38°	62°	65°	68°
φ_1	90°	66°	63°	60°	90°	66°	63°	60°
Вершина ребра	17	13	13	27	13	11	11	19
Средняя часть ребра	30	27	25	31	21	19	23	21
Основание ребра	41	38	32	40	26	24	22	21

В результате данной серии экспериментов получено, что в средней части ребра средняя степень упрочнения составила 28 % для стали 30ХГСА и 21 % для стали 38Х2МЮА. Установлено, что значения микротвердости возрастают от вершины ребра к основанию. В основании ребра формируется область с повышенной микротвердостью за счет дополнительной деформации при отгибании формируемого ребра в процессе ДР. Уменьшение степени упрочнения у вершины ребра свидетельствуют об уменьшении накопленной деформации материала ребра в этой области.

Эксперименты по определению распределения микротвердости по толщине ребра проводились на стали 30ХГСА с разной геометрией инструмента для ДР. Отпечатки индентора микротвердомера располагались на металлографическом шлифе перпендикулярно боковой стороне ребра (Рис. 6). Было установлено, что в зоне у прирезцовой стороны ребра, контактирующей с передней поверхностью инструмента, наблюдается возрастание значений микротвердости по сравнению с микротвердостью в средней части ребра. В зоне у свободной стороны ребра, не контактирующей с передней поверхностью инструмента, напротив, наблюдается снижение микротвердости по отношению к сердцевине ребра. Прирезцовая зона имеет толщину около 25...50 мкм, величина микротвердости в ней на 8 % выше, чем в средней зоне. Данная особенность распределения микротвердости по ширине ребра формирует на обработанной поверхности слоистую структуру из чередующихся слоев переменной твердости.

Для определения влияния скорости резания и скорости деформации на микротвердость формируемого макрорельефа было проведено измерение микротвердости материала образцов из стали 30ХГСА, обработанных методом ДР при различных скоростях резания. Скорость резания варьировалась от 0,4 м/с

до 1,6 м/с, так как данный диапазон охватывает рекомендуемые для практического применения значения скорости резания. В результате экспериментов выявлено, что скорость резания и скорость деформации несущественно влияет на микротвердость обрабатываемого материала в выбранных диапазонах скорости резания. С увеличением скорости резания среднее значение микротвердости увеличилось на 9%. Данная особенность позволяет пренебречь влиянием скорости деформации на твердость материала формируемого ребра при ее теоретическом расчете.

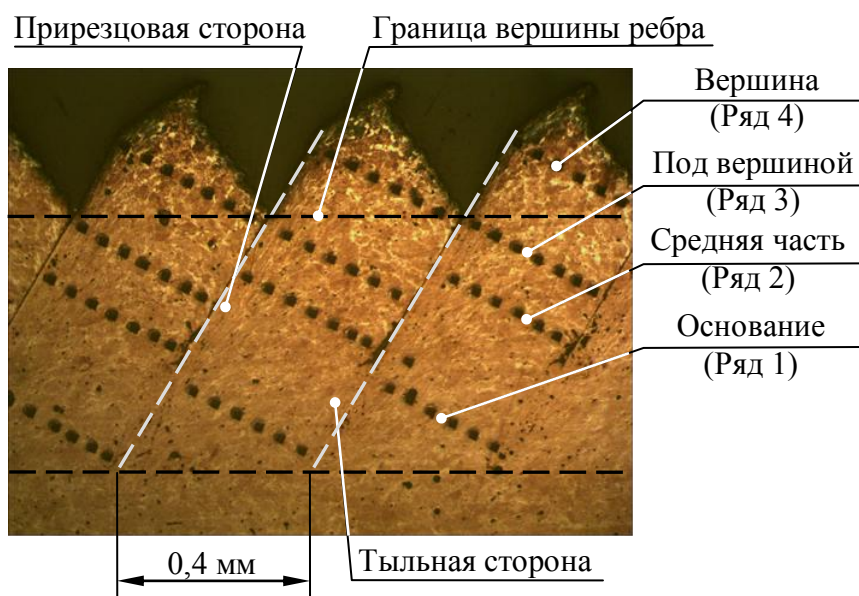


Рис. 6. Упрочненный макрорельеф на стали марки 30ХГСА и отпечатки индентора микротвердомера в разных зонах ребра

Отдельная серия измерений микротвердости была проведена на образцах из коррозионностойкой стали аустенитного класса марки 12Х18Н10Т. Упрочнение стали 12Х18Н10Т и других аустенитных сталей методом ДР является перспективным направлением, так как аустенитные стали не упрочняются термической обработкой. Аустенитные стали по сравнению с феррито-

перлитными сталями имеют большую склонность к упрочнению при пластической деформации, что объясняется различиями в их кристаллической решетке.

Микротвердость стали 12Х18Н10Т измерялась на пяти образцах макрорельефа, полученных при разных значениях подачи инструмента для ДР. Подача изменялась от 0,2 до 0,4 мм/об с шагом 0,05 мм/об. Измерения проводились в девяти характерных зонах ребра, выявленных при проведении измерений на стали 30ХГСА. Измерение в каждой зоне повторялось десять раз. На стали 12Х18Н10Т не выявлено влияние величины подачи на степень упрочнения. Измеренные значения микротвердости сравнивались с расчетными значениями. В целом микротвердость изменялась от 317 HV 0,1 до 383 HV 0,1 при исходных значениях микротвердости от 207 HV 0,1 до 247 HV 0,1. В среднем степень упрочнения материала ребра составляла 54 %.

В пятой главе проведена оценка эксплуатационных характеристик поверхностей трения с упрочненным макрорельефом. С этой целью были проведены испытания на трение и износ образцов из сталей 30ХГСА, 38Х2МЮА, 08Х18Н10Т по двум схемам трения. При испытаниях измерялись интенсивность изнашивания и коэффициент трения.

Испытания упрочненных образцов проводились на сталях марок 30ХГСА и 38Х2МЮА по схеме трения качения с проскальзыванием (Рис. 7). Целью ис-

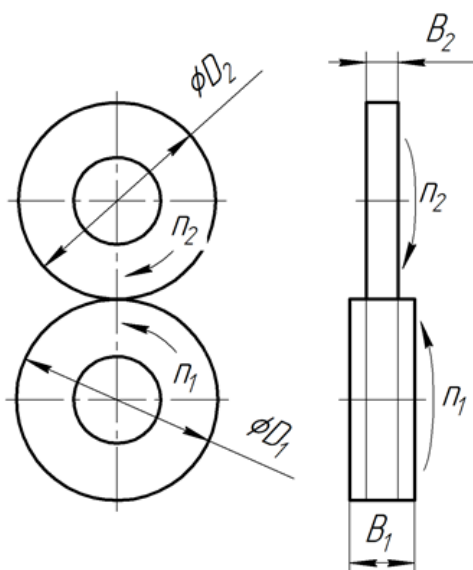


Рис. 7. Схема трения при испытании образцов из стали 30ХГСА и 38Х2МЮА

пытаний являлось определение триботехнических характеристик поверхностей трения, упрочненных методом ДР. Для каждой марки стали были изготовлены цилиндрические образцы с упрочненным макрорельефом на поверхности трения. Соотношение главного и вспомогательного углов в плане инструмента, используемого для формирования макрорельефа, приведены в Таблице 3. Полученный упрочненный сформирован из плотно сжатых наклонных ребер без зазоров, имел толщину равную 0,5 мм и шаг между ребрами – 0,4 мм. Режимы обработки составляли $t = 0,75$ мм, $S_0 = 0,4$ мм/об, $v_0 = 0,78$ м/с. Контртелом являлось кольцо из твердого сплава марки ВК8. Скорость проскальзывания составляла 0,05 м/с, расчетное максимальное давление в зоне трения составляло около 430 МПа. Такие условия трения интенсифицировали процесс изнашивания и сокращали время испытаний. Перед началом испытания осуществлялось однократное смазывание пары трения маслом марки И20А. Величина износа измерялась весовым методом, после чего рассчитывался линейный износ, по которому определялась интенсивность изнашивания I_L в безразмерном виде. Полученные значения интенсивности изнашивания I_L представлены в Таблице 3.

Таблица 3.

Результаты испытаний на трение и износ образцов из сталей 30ХГСА и 38Х2МЮА

Материал	ϕ	ϕ_1	I_L
30ХГСА	62°	66°	$9,28 \cdot 10^5$
	65°	63°	$8,51 \cdot 10^5$
	68°	60°	$8,60 \cdot 10^5$
38Х2МЮА	62°	66°	$6,89 \cdot 10^5$
	65°	63°	$7,33 \cdot 10^5$
	68°	60°	$8,76 \cdot 10^5$

На стали 30ХГСА наименьшую интенсивность изнашивания имел макрорельеф, сформированный инструментом для ДР с углами $\phi = 65^\circ$ и $\phi_1 = 63^\circ$, а на стали 38Х2МЮА – макрорельеф, полученный инструментом с $\phi = 62^\circ$ и $\phi_1 = 66^\circ$. Сопоставление результатов данного эксперимента с результатами по измерению микротвердости образцов позволяет предположить, что в случае обработки методом ДР наилучшие результаты по снижению интенсивности изнашивания дает не максимальная степень упрочнения, а некоторое соотношение степени упрочнения и накопленной деформации, приобретенной материалом. Это связано с тем, что с ростом деформации материала исчерпывается его

ресурс пластичности, что негативно влияет на его износостойкость, то есть с ростом накопленной деформации положительный эффект от упрочнения нивелируется уменьшением ресурса пластичности материала. Ограничение на выбор геометрии инструмента для ДР также накладывает форма получаемого макрорельефа. Инструмент с $\varphi = 68^\circ$ и $\varphi_1 = 60^\circ$ формирует макрорельеф из плотно сжатых ребер с минимальным количеством дефектов, обнаруженных на металлографических шлифах. Инструмент с данной геометрией позволяет формировать упрочненный макрорельеф без срыва ребер. Поэтому для практического применения данная геометрия более перспективна и дальнейшие испытания на трение и износ проводились именно с этими геометрическими параметрами инструмента.

Испытание образцов из стали 08X18H10T проводились по схеме трения скольжения колодка-цилиндр (Рис. 8). Испытуемые образцы изготавливались в форме колец с цилиндрической поверхностью трения, а контртело в форме колодки, охватывающей поверхность трения. Материалом контртела являлась закаленная сталь ШХ15 с твердостью 60..62 HRC. Испытания проводились при скорости скольжения $v_c = 0,40$ м/с и номинальном давлении $P_n = 2,3$ МПа. Смазывание осуществлялось маслом марки И-20А капельным способом с расходом 4..6 капель в минуту. Целью испытаний являлось сравнение интенсивности изнашивания поверхностей трения с упрочненным макрорельефом и поверхностей трения, упрочненных алмазным выглаживанием.

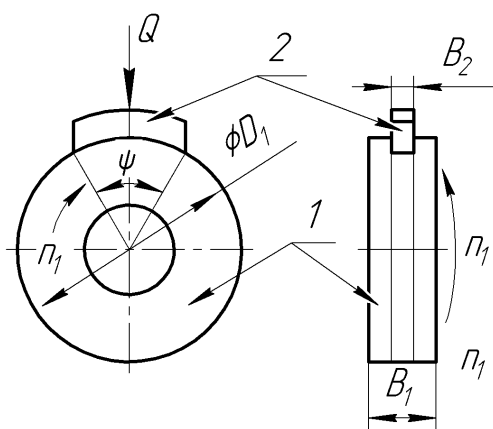


Рис. 8. Схема трения при испытании образцов из стали 08X18H10T

Измерение линейного износа проводилось с помощью индикатора часового типа с ценой деления 1 мкм. Интенсивность изнашивания определялась как отношение линейного износа к пройденному пути трения и выражалась в безразмерных величинах.

Интенсивность изнашивания образца, обработанного алмазным выглаживанием, составила $5,26 \cdot 10^{-7}$, а интенсивность изнашивания образца, обработанного методом ДР, составила $5,56 \cdot 10^{-7}$, то есть эффект от деформационного упрочнения методом ДР сопоставим с эффектом от упрочнения алмазным выглаживанием.

Основным преимуществом метода ДР по сравнению с алмазным выглаживанием является значительная глубина упрочнения, достигающая 1,5 мм, в то время как глубина упрочненного слоя после алмазного выглаживания составляет десятые доли миллиметра. Кроме того, алмазное выглаживание и другие методы ППД формируют упрочненный слой с неравномерным, уменьшающимся по глубине распределением микротвердости, в то время как метод ДР позволяет получить более равномерное распределение микротвердости по толщине упрочненного слоя.

В шестой главе приводятся практические рекомендации и методика деформационного упрочнения методом ДР. Методика включает указания по

входному контролю обрабатываемого материала и заготовок перед обработкой методом ДР, параметры используемого инструмента, режимы резания, выбор вариантов стратегии обработки метода ДР, указания по окончательной обработке упрочненной поверхности. В главе представлен список марок сталей и инструментальных материалов, на которых была опробована методика получения упрочненного поверхностного макрорельефа. Список обрабатываемых материалов включает стали марок 30ХГСА, 38Х2МЮА, 08Х18Н10Т, 12Х18Н10Т. При их обработке использовались инструментальные материалы марок Т14К8, Т5К10, ВК8.

Общие выводы

1. Анализ способов поверхностного деформационного упрочнения выявил, что проблема повышения толщины деформационно-упрочненного слоя и равномерности распределения твердости по его толщине может быть эффективно решена на основе использования метода ДР, обеспечивающего равномерное распределение твердости при повышенной глубине упрочнения.

2. Доказано, что деформационное упрочнение в процессе ДР происходит в результате деформации в трех зонах: в зоне основных сдвиговых деформаций на режущей кромки, зоне изгибных деформаций у деформирующей кромки и зоне изгиба подрезанного слоя в его основании.

3. На основе положений теории пластичности установлена математическая зависимость твердости упрочненного поверхностного слоя от геометрических параметров инструмента и режимов деформирующего резания. Установлено, что основным параметром, влияющим на твердость упрочненного слоя, является величина накопленной деформации. Расхождение расчетных и экспериментальных данных составило не более $\pm 10\%$.

4. Установлено что повышение твердости поверхности в результате упрочнения методом ДР, составляет для сталей ферритно-перлитного класса до 28 % и до 54 % для сталей аустенитного класса при обеспечении равномерности распределения твердости по толщине упрочненного слоя.

5. Установлено, что эффективной областью использования метода ДР является деформационное поверхностное упрочнение сталей аустенитного класса с требуемой толщиной упрочненного слоя более 1,0 мм, при существенном повышении производительности деформационного упрочнения по сравнению с алмазным выглаживанием и отказе от сложной станочно инструментальной оснастки.

6. Триботехническими испытаниями подтверждена работоспособность предлагаемого метода упрочнения. Интенсивность изнашивания образцов, упрочненных методом ДР, сопоставима с интенсивностью изнашивания образцов, упрочненных алмазным выглаживанием, при этом метод ДР обеспечивает практически двукратное увеличение толщины упрочненного слоя.

7. Установлены особенности реализации метода ДР, которые явились основой разработанных технологических рекомендаций и методических указаний по практическому использованию метода ДР для поверхностного упрочнения деталей машин.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Разработка принципов целенаправленного изменения эксплуатационных свойств поверхностей деталей методами глубинного механического воздействия : Заключительный отчет о НИР / МГТУ им. Н.Э. Баумана. Руководитель темы А.Е. Древаль. Исполнители Зубков Н.Н., Васильев С.Г., Шуляк Я.И. [и др.] ГР № 01201000112, Инв. № 02201151421. М., 2010. 108 с. (6,75 п.л./1,62 п.л.)
2. Васильев С.Г., Шуляк Я.И. Создание поверхностных макроструктур с увеличенной твердостью методом деформирующего резания // Будущее машиностроения России: Сб. трудов 4-й Всерос. конф. молодых ученых и специалистов. Москва. 2011. С. 13-14. (0,75 п.л./0,19 п.л.)
3. Шуляк Я.И. Получение упрочненных макроструктур методом деформирующего резания на поверхностях деталей машин // Труды. РКК «Энергия» им. С.П.Королева. Серия 12. Выпуск №1-2. Материалы 19-й научно-технической конференции молодых ученых и специалистов // Королев. 2011. С. 80-85. (0,62 п.л./0,31 п.л.)
4. Васильев С.Г., Шуляк Я.И. Изменение твердости поверхности детали методом механической обработки // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2011. №11. С. 77-82. (0,75 п.л./0,37 п.л.)
5. Васильев С.Г., Шуляк Я.И. Получение упрочненных макроструктур методом деформирующего резания // Инновации в машиностроении: Сб. трудов Международной молодежной конференции. Томск. 2012. С. 203-206. (0,67 п.л./0,33 п.л.)
6. Разработка технологий и средств технологического оснащения для обеспечения производства судового оборудования в Северо-Западном регионе России : Заключительный отчет на ОКР / МГТУ им. Н.Э. Баумана. Руководитель темы Зимин В.Н., исполн. Зубков Н.Н., Васильев С.Г., Шуляк Я.И. [и др.] ГР № И 01201280535, Инв. № 2011232. М., 2013. 310 с. (31 п.л./0,72 п.л.)
7. Модернизация машины трения типа «Amsler» / Шуляк Я.И. [и др.] // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2014. №9. С. 33-37. (0,75 п.л./0,19 п.л.)
8. Шуляк Я.И. Особенности деформационного упрочнения поверхностного слоя деталей методом деформирующего резания // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2015. №3. С. 3-10. (0,94 п.л.)
9. Шуляк Я.И., Васильев С.Г. Модернизация установки измерения сил резания на базе динамометра УДМ-600 // Машины и Установки: проектирование, разработка и эксплуатация. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2016. № 01. С. 1-12. URL: http://maplantsjournal.ru/file/839068.html?__s=1 (дата обращения 11.05.2017) (0,62 п.л./0,31 п.л.)