

На правах рукописи

Васильев Сергей Геннадьевич

**Разработка комплекса технологических решений
по созданию упрочненных поверхностных структур
повышенной износостойкости
на основе метода деформирующего резания**

Специальность: 2.5.5 – Технология и оборудование механической
и физико-технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук



Москва – 2026

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

Научный консультант: Зубков Николай Николаевич
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры инструментальной техники
и технологий МГТУ им Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: Гречишников Владимир Андреевич
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры инструментальной техники
и технологии формообразования
ФГАОУ ВО «МГТУ СТАНКИН»

Кузнецов Виктор Павлович
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры технологии машиностроения,
станков и инструментов ФГАОУ ВО «УрФУ»

Верещака Алексей Анатольевич
доктор технических наук, доцент, главный
научный сотрудник Института конструкторско-
технологической информатики РАН

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет»

Защита состоится « ____ » _____ 2026 г., в _____ час.
на заседании диссертационного совета 24.2.331.02. 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)263-66-33 доб. 40-57

Автореферат разослан « ____ » _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент

А.В. Богданов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Основополагающими задачами развития машиностроения являются повышение надежности, долговечности и снижение энергоемкости работы узлов трения машин и механизмов.

Работоспособность узлов трения определяется характеристиками поверхностного слоя, от которых напрямую зависят эксплуатационные параметры узлов механизма и механизма в целом. Основными методами повышения характеристик поверхности трения являются модификация поверхности или создание различных типов износостойких покрытий. В машиностроении проблема повышения долговечности узлов трения приводит к поиску новых и перспективных методов и технологических решений повышения износостойкости. Данная проблема особенно актуальна для решения задач при повышении интенсивности рабочих процессов, увеличении скорости взаимного перемещения рабочих узлов при повышенных контактных давлениях и температурах и в условиях ограниченной подачи смазки.

Известно множество методов и способов упрочнения поверхностного слоя для повышения его износостойкости, каждый из которых обладает индивидуальными преимуществами и недостатками.

Возрастающие требования к поверхности трения указывают на то, что разработка новых методов и способов формирования заданных свойств поверхностного слоя в узлах трения скольжения, является актуальной при решении задач по повышению износостойкости и увеличения ресурса работы узлов трения.

Современные исследования приводят доказательства, что лучшими эксплуатационными характеристиками обладают поверхности с оптимальным сочетанием твердых составляющих в пластичной матрице. Разработка поверхностных структур такого типа является важным научным направлением создания новых свойств поверхности способных повышать износостойкость.

Новым подходом к созданию поверхностных структур повышенной износостойкости является использование перспективного метода механической обработки - деформирующего резания (ДР), как самостоятельного технологического приема, так и в сочетании с известными методами упрочняющей обработки.

Цель работы

Целью работы является разработка новых технологических решений по повышению износостойкости деталей трения скольжения на основе поверхностных макроструктур, получаемых деформирующим резанием.

Задачи

1. Анализ существующих проблем повышения эксплуатационных характеристик поверхностей деталей трения и путей их устранения.
2. Разработка принципиальных решений и технологических вариантов создания износостойких поверхностных структур как самостоятельно, так и в сочетании с известными методами упрочнения поверхности.
3. Создание методики управления параметрами ДР для получения поверхностных структур требуемых характеристик на основе моделирования температурно-силового взаимодействия инструмента с обрабатываемым материалом.

4. Выбор рациональных параметров процесса ДР при получении поверхностной макроструктуры для разработанных вариантов упрочнения.

5. Разработка и исследование методов повышения износостойкости поверхности трения при непосредственном использовании только метода ДР (деформационное и закалочное упрочнение).

6. Разработка комбинированных методов повышения износостойкости на основе поверхностных макроструктур, полученных ДР с последующим использованием современных методов упрочнения поверхности.

7. Исследования эксплуатационных характеристик упрочненных слоев. Определение областей рационального использования получаемых структур и разработанных методов их получения.

8. Апробация разработанных технологических методов упрочнения поверхностного слоя по предлагаемым вариантам повышения износостойкости в производственных условиях.

Объект исследования

Методы повышения износостойкости деталей трения скольжения.

Предмет исследований

Деформирующее резание как средство создания упрочненных поверхностных структур повышенной износостойкости.

Научная новизна

1. Разработана методология использования ДР для повышения износостойкости поверхностей трения.

2. На основе теории подобия при резании металлов разработана методика расчета температурного и силового взаимодействия инструмента в зоне ДР, позволяющая определять сочетания и ограничения технологических параметров процесса ДР при получении макроструктур заданных параметров на сталях.

3. Научно обоснован и экспериментально подтвержден способ получения закалочных поверхностных структур непосредственно методом деформирующего резания, защищенный патентом РФ.

4. Разработан метод модификации поверхности, основанный на диффузионном легировании макрорельефа, полученного ДР на сталях. Доказано, что макрорельеф может являться матрицей для последующей химико-термической обработки, что позволило получить композиционные структуры с вертикальным или наклонным расположением функциональных слоев при постоянстве их твердости и распределении легирующего элемента по толщине упрочненного слоя.

5. Доказана перспективность использования макрорельефа, получаемого ДР при внедрении в него твердосмазочных материалов с целью создания самосмазывающихся поверхностей трения.

Практическая значимость

1. Для деталей трения скольжения достигнуто повышение износостойкости в 1,5...3,0 раза при уменьшении склонности к образованию задиров в 2,2...3,2 раза по сравнению с химико-термической обработкой без подготовки поверхности методом ДР.

2. Разработаны методы поверхностного упрочнения, обеспечивающие равномерное распределение твердости по глубине упрочненного слоя:

- деформационное упрочнение поверхности незакаливаемых материалов с повышением твердости на 50...80 % и глубиной до 1,5 мм,
- закалка поверхности методом ДР с получением твердости до 63 HRC глубиной до 0,8 мм,
- разработана технология получения композиционных износостойких покрытий толщиной до 1,5 мм с управляемой структурой и свойствами.

3. Разработаны рекомендации по созданию самосмазывающихся узлов трения скольжения путем размещения твердосмазочных материалов в макроструктурах, полученных ДР.

4. Разработан метод восстановления размеров и свойств посадочных поверхностей валов на основе метода ДР.

5. Предложены области рационального использования разработанных методов упрочнения. Проведена апробация разработанных методов на восьми промышленных предприятиях для упрочнения колонн вырубных штампов, восстановления размеров и свойств поверхности крупногабаритных валов и механизма цевочного зацепления энергетического оборудования, узла трения поворотного механизма экскаватора, повышения износостойкости внутренней конической поверхности крупногабаритных деталей запорной нефтеперекачивающей аппаратуры.

Методы исследования и достоверность полученных результатов

Работа выполнена с использованием теоретических и экспериментальных методов исследования. Экспериментальные исследования проводились с использованием отработанных методик на современных аттестованных средствах измерения в лабораториях МГТУ им Н.Э. Баумана. Измерения и анализ экспериментальных данных проводились с использованием современной системы сбора и обработки данных на платформе среды графического программирования LabVIEW. Оценка полученных результатов проводилась с использованием металлографического микроскопа «Olympus» GX-51, автоматического микротвердомера EMCO-TEST DuraScan-70, спектрометра модели LAES MATRIX, триботехнического оборудования Института машиноведения РАН РФ, модернизированной машине трения Amsler A135. Диффузионное насыщение проводилось на промышленном и специальном оборудовании. Подтверждена достоверность и воспроизводимость полученных результатов. Выводы теоретических исследований согласуются с результатами экспериментальных исследований.

Теоретические исследования базируются на основных положениях теории резания, теории подобия при резании металлов, основ теплофизики технологических процессов при механической обработке. Расчеты и анализ результатов проводились с использованием современных сред программирования и моделирования, на базе NI LabVIEW, Mathcad, Autodesk Inventor Professional.

Положения, выносимые на защиту

1. Метод ДР является эффективным средством повышения износостойкости стальных поверхностей трения скольжения как самостоятельное средство повышения твердости поверхностного слоя, так и в совокупности с последующими методами поверхностного упрочнения.

2. Подготовка поверхности детали методом ДР при последующей химико-термической обработке позволяет избежать экспоненциального падения твердости по толщине упрочненного слоя.

3. Подготовка поверхности методом ДР позволяет существенно повысить прочность сцепления наносимого газотермического покрытия за счет анкерного эффекта удержания покрытия развитым регулярным макрорельефом.

4. Метод ДР позволяет увеличивать диаметральные размеры изношенных валов за счет создания подповерхностной пористости.

5. Межреберные зазоры макрорельефа в виде оребрения являются карманами для размещения твердосмазочных материалов, позволяя создавать самосмазывающиеся поверхности трения скольжения.

6. Токарная обработка методом ДР позволяет закаливать поверхностный слой стального вала на глубину до 0,8 мм, что является альтернативой существующим методам поверхностной закалки.

7. Метод ДР для незакаливаемых материалов позволяет поднять твердость поверхности на 50–80 % на глубину до 1,5 мм за счет деформационного упрочнения материала.

8. Структура поверхности трения, состоящая из чередующихся тонких слоев упрочненного материала различной твердости, обладает большей износостойкостью по сравнению с однородным упрочненным слоем.

Апробация результатов

Результаты работы обсуждались на следующих мероприятиях: всероссийская научно-техническая конференция «Машиностроительные технологии». Москва, 1998, международная молодежная конференция «Инновации в машиностроении», Юрга, 2012, международный семинар-конференция «Организация ремонтов энергооборудования: проблемы, опыт, перспективные технологии» Москва, 2014 г., международная научно-техническая конференция «Трибология - машиностроению», Москва, 2016, международная научно-практическая конференция «Ключевые тренды в композитах: Наука и технологии» Москва 2018 и 2019 гг., международный форум «Ключевые тренды в композитах: наука и технологии» международная научно-практическая конференция. 2018 и 2019 г, международная научно-технической конференция «Высокие технологии в промышленности России», Москва, 2008, всероссийская научно-методическая конференция, посвященная 100-летию со дня рождения Н.П. Малевского Москва, 2020, двенадцатая всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее Машиностроения России», Москва, 2014, 2016 и 2019 гг, академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства. («Королёвские чтения») Москва, 2021 и 2022 гг., всероссийская научно-практическая конференция «Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство» Старый Оскол, 2024.

Публикации

Основное содержание диссертации отражено в 48 научных трудах, из них 17 работ, входящих в перечень рекомендованных ВАК РФ рецензируемых журналов, 8 публикаций в изданиях индексируемые в Scopus или WoS. Получены 2 патента на изобретение. Общий объем 3,54 п. л.

Личный вклад

Проведен анализ проблем получения поверхностных структур повышенной износостойкости. Разработаны методы и способы получения структур повышенной износостойкости при использовании ДР. Произведено моделирование и расчет температурно-силового взаимодействия инструмента и подрезаемого слоя обрабатываемого материала для управления параметрами ДР. Выполнены экспериментальные исследования, проведена обработка и интерпретация полученных данных. Проведены испытания по выявлению приоритетных параметров поверхностных структур, повышающих износостойкость деталей трения.

Реализация и внедрение результатов работы

Результаты работы использованы в ОАО «Мосэнергоремонт» при изготовлении партии деталей с композиционным упрочняющим покрытием цевочного механизма РВП-88, выполнены работы по восстановлению посадочных мест крупногабаритных валов теплоэнергетического оборудования с передачей их в эксплуатацию на ТЭЦ-8, ТЭЦ-16, ТЭЦ-21, ТЭЦ-23. Восстановлен вал перекачивающего насоса на ЗаГАЭС. По договору между МГТУ им. Н.Э. Баумана и ООО «Нефтемашдеталь» изготовлена партия деталей под запрессовку твердосмазочных полимерных материалов для узлов трения нефтеперекачивающего оборудования. В ПК «Салют» АО «ОДК» упрочнены направляющие колонны вырубных штампов. Для концерна «Сарэкс» изготовлен комплект подшипников скольжения с композиционной структурой поверхностного слоя поворотного механизма экскаватора. Технология подготовки поверхностей под запрессовку терморасширенного графита деталей запорной нефтеперекачивающей аппаратуры внедрена в ООО «Силур». С ИМАШ РАН проведена совместная работа по оптимизации упрочняющих покрытий, полученных на основе ДР. Для НИИЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана выполнена подготовка поверхности партии направляющих станков-автоматов под сверхзвуковое газотермическое напыление твердосплавного покрытия ВК15. Перечисленные результаты реализации работы подтверждены соответствующими актами. Результаты работы также использованы в учебном процессе кафедры «Инструментальная техника и технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана в курсе лекций и в лабораторных работах по дисциплинам «Современные методы механической и физико-технической обработки» и «Спецглавы механической и физико-технической обработки» для студентов, обучающихся по специальностям 15.05.01 и 15.04.02.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из шести глав, общих выводов, списка использованной литературы из наименований и приложений. Содержание работы изложено на 250 страницах машинописного текста, включая 135 рисунков, 16 таблиц, 10 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, обоснована практическая значимость работы, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ существующих способов и проблем создания упрочненных поверхностных структур при использовании различных методов поверхностного упрочнения. Предложен способ ДР как средство решения проблемы повышения износостойкости.

Основополагающей задачей машиностроения является повышение надежности и долговечности работы машин и механизмов. Качество поверхностного слоя играет решающее значение для деталей, работающих в парах трения узлов механизмов машин строительного, горнодобывающего, сельскохозяйственного, металлообрабатывающего комплекса и др. Интенсификация скоростей и контактных давлений узлов трения кратно увеличивает роль износостойкости поверхностных слоев.

Методы упрочнения поверхности разделяются по основным направлениям: изменение структуры поверхностного слоя, изменение химического состава поверхностного слоя, нанесение покрытий.

К широко используемым методам упрочнения путем изменения структуры поверхностного слоя относятся методы поверхностного пластического деформирования (ППД) и методы поверхностной термообработки. К основным методам ППД относятся выглаживание, раскатывание, дорнование, деформирующее протягивание (Суслов А.Г., Кудрявцев И.В., Школьник Л.М., Шнейдер Ю.Г., Одинцов Л.Г., Totten G., Dennis Dow и др.). Недостатком метода является относительно низкий уровень увеличения характеристик упрочненного слоя.

К методам поверхностной термообработки относятся способы концентрированного воздействия потока энергии на поверхность, при лазерном воздействии (Григорьянц А.Г., Цветков Е.Н. Смирнов А.В., Lawrence J. и др.) газопламенном, плазменном воздействии, а также токами высокой частоты (Бернштейн М.Л., Замовский В.А.). Данные способы отличаются локализацией термического воздействия, высокими скоростями нагрева и охлаждения. Недостатками поверхностной термообработки являются относительно высокая энергоемкость и необходимость использования высокотехнологичного оборудования.

Метод упрочнения поверхностного слоя изменением химического состава поверхностного слоя путем легирования широко используется в технологиях упрочнения. К данным методам относится химико-термическая обработка (ХТО) (Лахтин Ю.М., Арзамасов Б.Н., Богатырев Л.Г., Davis J.R. и др.), электроэрозионное, лазерное и другие типы легирования. К основным способам ХТО относятся цементация, азотирование, борирование, алитирование, хромирование и другие. Недостатками процесса легирования методом ХТО является изменение концентрации легирующего элемента по толщине покрытия, что приводит к снижению свойств покрытия по мере его износа, а также ограничение в получении упрочненного слоя более 1,0...1,5 мм.

Нанесение покрытий позволяет увеличить износостойкость, жаростойкость, антифрикционные свойства поверхности. Распространенными способами являются газотермические методы включая газопламенную металлизацию, электродугую, плазменную, индукционную металлизацию, сверхзвуковое напыление порошков (Смирнов А.В., Воронецкий А.В., Ялтаева А.Р., Pakielā W.,

Tański T. и др.), Высокая эффективность, возможность нанесения различных материалов определяет использование этого метода в различных отраслях промышленности. Широкое распространение получили PVD и CVD методы нанесения износостойких покрытий (Верещака А.С., Усольцев А.А., Понаморов А.Н., Кривошеин С.Н., Pieter de Blitterswijk и др.).

Покрытия имеют выраженную границу с основой, от свойств которой в большой степени зависит в целом работоспособность покрытия. При нанесении покрытия большое значение имеет предварительная подготовка поверхности для увеличения прочности сцепления покрытия с основой. Это относится в первую очередь к газотермическим методам, где существует недостаточная прочность сцепления покрытия с основой. Относительно высокая пористость, перегрев поверхности, энергоемкость процесса, недостаточная прочность сцепления с основой ограничивают использование данного метода.

Активные исследования ведутся в области комбинированных методов повышения износостойкости, таких как электроискровое или лазерное легирование с последующим ударным воздействием (Смирнов А.В., Ялтаева А.Р.), термомеханическая обработка (Бернштейн М.Л., Займовский В.А.), нанесение покрытий с последующей термообработкой и др.

Проблема повышения эксплуатационных параметров упрочненного слоя может быть решена путем модернизации существующих технологий и разработки новых технологических решений, способных изменять структуру поверхностного слоя, его химический состав, прочность соединения покрытия с основой.

Вариантом решения части существующих проблем упрочнения поверхностного слоя является использование относительно нового метода механической обработки - деформирующее резание (ДР) как самостоятельного метода упрочнения, так и в сочетании с существующими методами поверхностного упрочнения.

Деформирующее резание – метод механической обработки, разработанный в МГТУ им. Н.Э. Баумана. В отличие от обычного резания, где припуск удаляется в виде стружки, метод ДР основан на подрезании и пластической деформации слоев материала заготовки. Подрезанный слой по своей узкой стороне остается прикрепленным к основному материалу, формируя ребра на обработанной поверхности. Метод ДР нашел свое основное применение для получения развитых поверхностей теплообмена, фильтрующих и капиллярных структур.

Использование метода ДР для упрочнения поверхностей предложено в патенте (РФ №2044606) и диссертации Зубкова Н.Н. и развито в патенте (РФ № 2015202 Зубков Н.Н., Овчинников А.И., Васильев С.Г.) и кандидатской диссертации Васильева С.Г.

Реализация метода ДР как комплексного средства повышения износостойкости деталей трения требует теоретических и экспериментальных исследований для установления особенностей обработки сталей, взаимосвязи технологических параметров режима обработки с геометрическими характеристиками получаемого макрорельефа, разработки технологических рекомендаций по практическому применению методов в промышленности.

Высокая производительность и технологичность метода ДР свидетельствует о конкурентоспособности и перспективности развития метода применитель-

но к упрочнению. Исходя из приведенного анализа в первой главе сформулирована цель работы и ее задачи.

Во второй главе проведен анализ возможных способов создания поверхностных структур повышенной износостойкости на основе метода ДР.

Метод ДР относится к способу механической обработки и реализуется на металлорежущем оборудовании токарной, фрезерной, строгальной группы.

Процесс формирования макрорельефа на наружной поверхности заготовки методом ДР изображен на рис. 1.

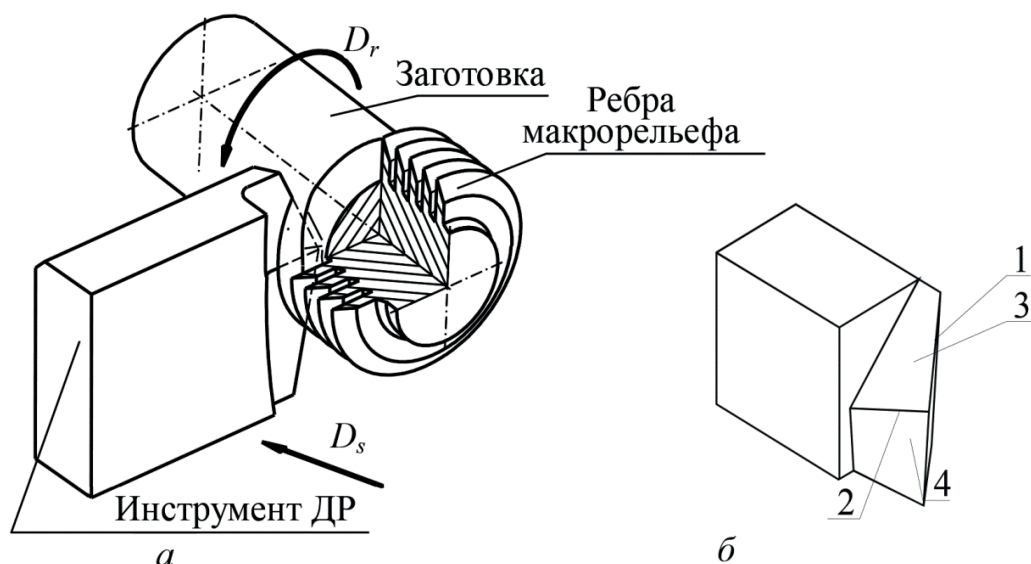


Рис. 1. Формирование макрорельефа методом ДР:

a — процесс формирования; *б* — элементы инструмента; 1 — главная режущая кромка; 2 — вспомогательная (деформирующая) кромка; 3 — передняя поверхность; 4 — вспомогательная задняя поверхность

При вращении заготовки и поступательном движении инструмента главная режущая кромка подрезает поверхностный слой материала заготовки, образуя на заготовке макрорельеф в виде регулярной оребренной структуры вертикального или наклонного характера. Подрезанные слои материала прочно прикреплены к обработанной поверхности заготовки, формируя в совокупности регулярный макрорельеф в виде оребрения. Оребрение расположено по винтовой линии на поверхности заготовки, и является по сути не отделившейся от заготовки стружкой. Параметрами макрорельефа можно управлять посредством изменения глубины резания t , подачи на оборот S_o , геометрии режущей части инструмента. Выбор и назначение геометрических параметров инструмента позволяет получать необходимые варианты оребренного макрорельефа. На рис. 2 и рис. 3 изображены варианты схем макрорельефа с вертикальным и наклонным расположением зазоров между слоями материала на поверхности заготовки. Разные варианты схем оребренной структуры реализуются в зависимости от соотношения главного ϕ и вспомогательного ϕ_1 угла в плане. При необходимости создания опорной поверхности треугольные заострения верхней части макрорельефа



удаляются механическим способом. Размерами зазоров между слоями можно управлять от теоретически плотного смыкания ребер до 0,5 мм за счет геометрических и технологических параметров процесса ДР. При создании рабочей опорной поверхности трения зазоры используются для удержания жидкой, пластичной, твердой смазки. При создании износостойкого слоя методами диффузион-

ного легирования величина зазора между слоями металла определяет скорость и концентрацию потока легирующих элементов на всю глубину макрорельефа.

При создании износостойкого покрытия газотермическими методами, зазор выполняет роль удержания частиц покрытия обеспечивающий надежное их соединение с материалом основы.

Величина зазора b между ребрами макрорельефа зависит от геометрических параметров инструмента, определяется из выражения

$$b = S_o(\sin\varphi_1 - \xi \cdot \sin\varphi),$$

где ξ — коэффициент искажения профиля ребра; φ, φ_1 — главный и вспомогательный угол в плане; S_o — продольная подача на оборот детали.

Толщина ребра a_p определяется из выражения $a_p = S_o \sin\varphi \xi$. Важным параметром макрорельефа является его высота. Для получения заданной высоты макрорельефа глубина ДР рассчитывается по формуле:

$$t = \frac{\sin\varphi}{\sin\varphi_1} \left\{ h_m \xi + \frac{S_o}{2} \left[\frac{(\sin\varphi_1 - \xi \sin\varphi)^2}{\sin\beta} - \xi^2 \sin\beta \right] \right\}.$$

где β — угол заострения инструмента в плане.

Перераспределение материала поверхностного слоя при ДР ведет к созданию открытой пористости в виде вертикальных зазоров между ребрами макрорельефа, в результате чего происходит увеличение диаметральных размеров изношенной поверхности детали типа вал относительно исходного. В этом случае (рис. 2) диаметр D_1 по вершине макрорельефа больше исходного диаметра вала D_0 , на величину ΔD , равную для вертикальных ребер:

$$\Delta D = \frac{2t(1 - \xi \sin\varphi)}{\xi \sin\varphi} - S_o \cos\varphi$$

и для наклонных ребер:

$$\Delta D = \frac{2t(\sin\varphi_1 - \xi \sin\varphi)}{\xi \sin\varphi} - S_o \sin(\varphi + \varphi_1).$$

Выражения по определению параметра ΔD , учитывает удаление треугольного заострения величиной h_l в обоих случаях расчета.

Разработаны варианты использования метода ДР для повышения износостойкости пар трения скольжения представлены на рис. 4.

Разработана методология создания поверхностных структур повышенной износостойкости, на основе, комплекса методов модификации поверхностного слоя используя деформирующее резание.

К вариантам повышения износостойкости деталей трения относятся следующие методы модификации поверхности деформирующим резанием.

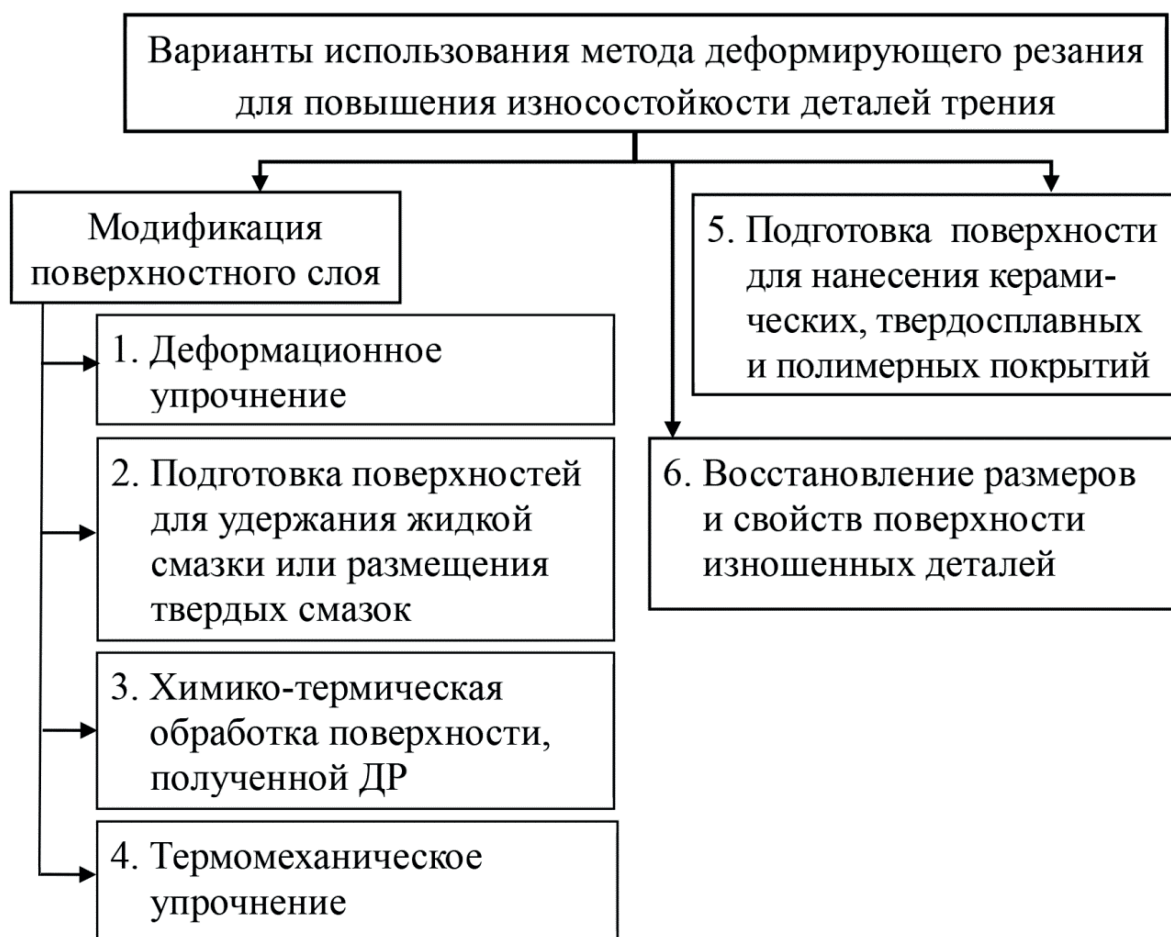


Рис. 4. Методы повышения износостойкости деталей трения при использовании ДР

Деформационное упрочнение относится к методу повышения твердости поверхностного слоя. Это достигается формированием плотно сжатых ребер (рис. 5). Увеличение твердости достигается за счет наклепа подрезаемого слоя во время силового контакта с инструментом ДР. В результате создается упрочненный слой с отсутствием падения твердости по толщине слоя. В кандидатской диссертации, выполненной Шуляком Я.И. подтверждена возможность метода упрочнения деталей трения из незакаливаемых материалов, в том числе для высоколегированных хромникелевых нетермоупрочняемых сталей аустенитного класса.

Перспективным направлением использования ДР является создания подповерхностных полостей для удержания смазки с организацией выхода смазки на поверхность трения. На поверхности создается макрорельеф с зазором, где межреберное пространство определяет размер полости для смазки. Опорная поверхность детали трения формируется пластическим деформированием вершин ребер путем обкатывания роликом или выглаживанием.

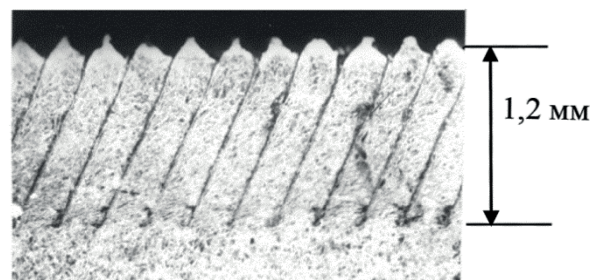


Рис. 5. Поверхностный слой детали, сталь 12Х18Н10Т, повышение твердости слоя в 1,3 раза по сравнению с исходной

Пластическое деформирование вершин доводится до момента их не полного смятия между собой, для создания капиллярного зазора, используемого для выхода смазки из полости на поверхность трения. В результате создаются условия равномерного распределения смазки по всей поверхности, что повышает износостойкость поверхности детали трения.

Предварительно созданный макрорельеф на поверхности трения эффективен для удержания твердых смазок, обладающих низким коэффициентом трения. Прочность сцепления покрытия достигается наличием замкового эффекта макрорельефа способного механически удерживать покрытие.

Перспективным новым методом повышения износостойкости деталей трения является совмещение метода ДР с последующей химико-термической обработкой макрорельефа. Совмещение методов позволило многократно повысить толщину упрочненного слоя при том же времени обработки за счет того, что легирование осуществляется с боковых сторон ребер по всей их высоте. Толщина упрочненного слоя определяется высотой макрорельефа ДР, а не временем процесса ХТО (рис. 6). Особенность комбинированного способа упрочнения является возможность получения композиционных структур различных типов, как с остаточной пористостью, так и беспористых. Определенное сочетание режимов ДР и параметров химико-термической обработки позволило получить упрочнённые композиционные структуры различных типов. Пористые упрочненные структуры после ХТО могут заполняются твердыми смазками на основе дисульфида молибдена или фторопласта с получением самосмазывающихся поверхностей трения.

Термомеханическое упрочнение поверхности методом деформирующего резания является новым решением получения закалочных зон в макрорельефе с полным исключением использования термического оборудования. Закалка поверхности производится при продольном точении инструментом ДР с последующей операцией чистового шлифования поверхности. Экспериментальные исследования, проведенные аспирантом Попцовым В.В. подтвердили возможности метода создания закалочных зон различной структуры и свойств на ряде конструкционных сталей, используемых для деталей трения.

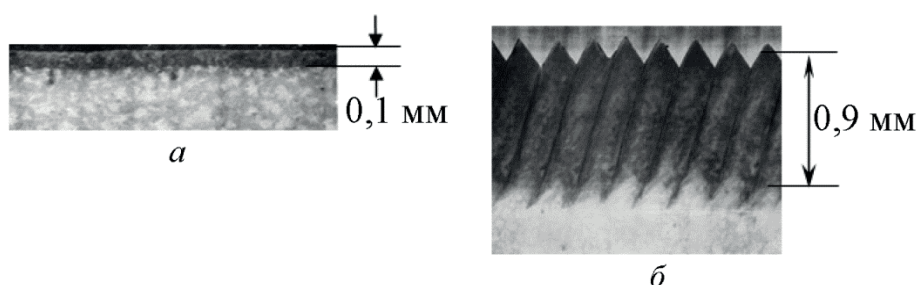


Рис. 6. Увеличение толщины упрочненного слоя за счет подготовки поверхности методом ДР. Сталь 20Х13. Низкотемпературная нитроцементация. Время ХТО одинаково а-ХТО без ДР, б- ХТО с подготовкой ДР

Создание макрорельефа заданной формы и размера перспективен для подготовки поверхности под последующее нанесение покрытий. Низкая прочность связи газотермических покрытий с основой является актуальной проблемой для нанесения керамических и металлокерамических материалов в связи с их свойствами, которые значительно отличаются от характеристик металлической основы. Вместе с тем керамические и твердосплавные покрытия обладают высокими эксплуатационными показателями для деталей трения. Метод ДР позволяет многократно увеличить площадь адгезионной связи покрытия с основой и обеспечить прочное механическое удержание покрытия. Получены положительные результаты повышения прочности сцепления плазменнонапыленного керамического покрытия, нанесенного на оребренную поверхность стального вала и сверхзвукового газопламенного напыления твердого сплава (руководитель профессор Воронежский А.В., МГТУ им. Н.Э. Баумана) на наружную поверхность стального кольца выглаживающей прошивки.

Использование метода ДР для восстановления изношенной поверхности заключается в перераспределении материала поверхности восстанавливаемой детали с увеличением линейных размеров на диаметр за счет создания вертикального макрорельефа с зазором между ребрами. Снижение несущей способности поверхности компенсируется повышенной твердостью материала ребер макрорельефа. При необходимости устранения поверхностной пористости возможно заполнение межреберного зазора ремонтными составами.

Анализ методов создания структур повышенной износостойкости позволил сформулировать требования, предъявляемые методу ДР: стабильность формирования макрорельефа, возможность управления параметрами макрорельефа, расширение области существования процесса ДР, возможность создания беспористых макроструктур, возможность создания закаленной макроструктуры, возможность расположения смазки в зазорах макроструктуры.

В третьей главе изложена методика управления параметрами ДР на основе расчета температурно-силового взаимодействия инструмента и подрезаемого слоя материала.

Методика расчета температурно-силовых параметров ДР производилась на основе теории подбоя при резании металлов, разработанной С.С. Силиным, А.Н. Рыкуновым, В.Ф. Безъязычным.

Тепловые и силовые явления, протекающие в зоне ДР, влияют на устойчивость процесса создания макрорельефа, создание условий получения высокой твердости макрорельефа за счет усилий от деформаций и температуры в зоне ДР.

Расчет тепловых параметров процесса ДР учитывал режимы обработки, геометрию инструмента, механические и теплофизические параметры обрабатываемого и инструментального материалов. Ключевым параметром количественной оценки силовых и теплофизических величин являлся угол наклона условной плоскости сдвига, расчет которого необходим для определения тепловыделения в зонах деформации, зоне трения подрезанного слоя с рабочими поверхностями инструмента.

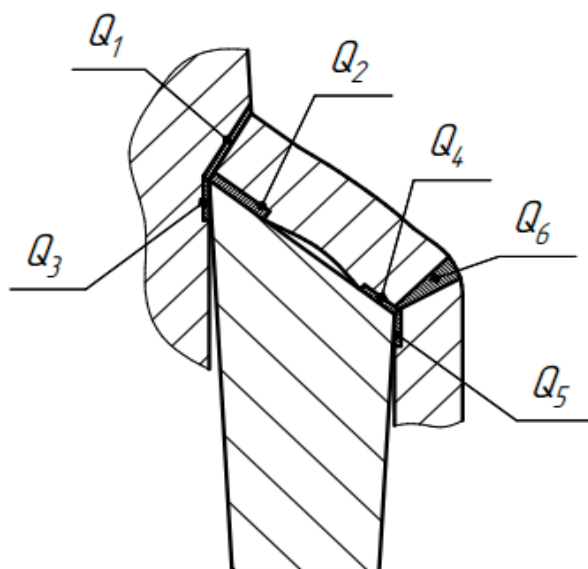


Рис. 7. Источники тепловыделения процесса ДР

новых источника тепловыделения: Q_4 — теплота трения на передней поверхности инструмента у деформирующей кромки; Q_5 — теплота трения на вспомогательной задней поверхности инструмента; Q_6 — теплота деформации подрезанного слоя при его изгибе в зоне деформирующей кромки.

Согласно теории подобия при резании, разработанной С.С. Силиным, угол наклона условной плоскости сдвига β_1 определялся из выражения, где величина B является параметром, характеризующим степень пластических деформаций срезаемого слоя:

$$B = \operatorname{tg} \beta_1 = \frac{mPe^n}{F^k D^p (1 - \sin \gamma)^q}$$

где F , D , Pe — критерии и безразмерные величины; m , n , k , p , q — коэффициенты, зависящие от безразмерных величин.

Критерий F отражает влияние геометрии инструмента ДР (β , ε), теплопроводности инструментального λ_p и обрабатываемого λ_0 материалов, Дж/(м·с·град). Критерий Пекле Pe отражает влияние режимных условий процесса по сравнению с влиянием теплофизических свойств обрабатываемого материала, где $a = \frac{\lambda_0}{c_p}$ коэффициент температуропроводности, c_p удельная объемная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(м³·град). Критерий D отражает геометрию сечения срезаемого слоя соотношением толщины и ширины подрезаемого слоя.

$$F = \frac{\lambda_p}{\lambda_0} \beta \varepsilon; \quad Pe = \frac{va_1}{a}; \quad D = \frac{a_1}{b_1}.$$

Тепловые потоки в зоне традиционного резания так и в зоне деформирующего резания взаимно перераспределяются сложным путем, так как источники

тепловыделения действуют независимо, и теплота от них распределяется между всеми телами.

Общее количество теплоты, выделяемой в процессе обработки, и распространение ее в качестве стоков в ребро макроструктуры, заготовку и режущий инструмент определяет уравнение баланса тепловой энергии процесса выражением:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 = Q_c + Q_n + Q_3$$

Каждый источник тепловыделения состоит из долевых частей, так Q_1 распределяется между ребром и деталью, Q_2 распределяется между ребром и инструментом, Q_3 распределяется между деталью и инструментом, Q_4 распределяется между ребром и инструментом, Q_5 распределяется между деталью и инструментом, Q_6 распределяется между ребром и инструментом.

Результирующие выражения источников тепловыделения в зоне деформирующего резания определяются формулами:

$$Q_1 = \frac{\tau_p v a_1 b_1}{B}, \text{ Вт}$$

$$Q_2 = F_n v_c = 1,495 \tau_p a_1 b_1 v \left(\frac{\cos \gamma + \sin \gamma}{B} - \cos \gamma + \sin \gamma \right), \text{ Вт}$$

$$Q_3 = F_1 v \cos \alpha = 0,5 \tau_p b_1 \rho_1 v \left(\frac{\pi}{3} + \frac{0,5 \sin \beta_1}{\cos(\beta_1 - \gamma) \sin \alpha} \right), \text{ Вт}$$

$$Q_4 = F_{n2} v_c = \sigma_m a_1 b_2 \cos \gamma \mu v, \text{ Вт}$$

$$Q_5 = F_{12} v \cos \alpha_1 = 0,5 \sigma_m b_2 \rho_1 \left(\frac{\pi}{3} + \frac{0,5 \sin \beta_1}{\cos(\beta_1 - \gamma) \sin \alpha} \right), \text{ Вт}$$

$$Q_6 = \sigma_m a_1 b_2 v \cos(90^\circ - |\gamma_1|), \text{ Вт}$$

где α , γ — задний, передний угол инструмента рад.; γ_1 — вспомогательный передний угол на деформирующей кромке; v — скорость резания м/с; β_1 — тангенс угла наклона условной плоскости сдвига; τ_p — предел прочности обрабатываемого материала на сдвиг; ρ_1 — радиус округления режущей кромки; μ — коэффициент трения в зоне деформирующей кромки; σ_m — предел текучести материала ребра в зоне деформирующей кромки; α_1 — толщина срезаемого слоя; b_1 — ширина срезаемого слоя; b_2 — ширина ребра в зоне деформирующей кромки; F_n , F_1 , F_{n2} , F_{12} — соответственно сила трения по передней поверхности, по главной задней поверхности, по передней поверхности у деформирующей кромки, по вспомогательной задней поверхности.

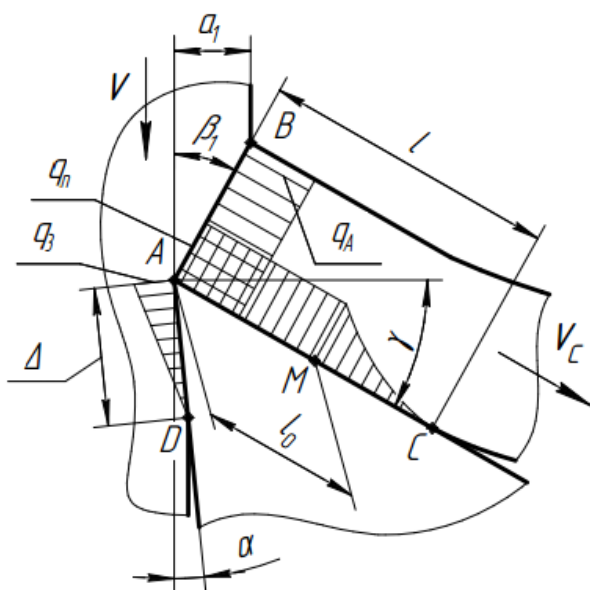


Рис. 8. Схема распределения источников тепловыделения в зоне главной режущей кромки

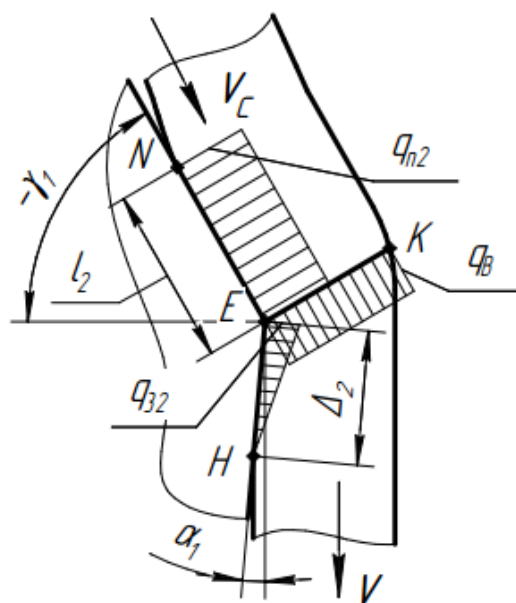


Рис. 9. Интенсивность источников тепловыделения в зоне деформирующей кромки

у деформирующей кромки; q_B — интенсивность в зоне пластической деформации; q_{32} — интенсивность от трения по вспомогательной задней поверхности (рис. 9).

Температура является параметром, влияющим на процесс создания закалочных зон в макрорельефе. Под температурой в зоне ДР принята величина

Интенсивность источников тепловыделения и их распределение в зоне ДР определялись на базе общепринятых положений теплофизики процесса резания, с учетом новых источников тепловыделения, характерных ДР.

Схематизация интенсивности распределения источников тепловыделения в зоне главной режущей кромки представлена на рис. 8. Итоговые выражения для расчета интенсивности источников тепловыделения зоны ДР, определяются выражениями:

$$q_A = \tau_p v \cos \beta_1, \text{ Вт/м}^2$$

$$q_n = \tau_p v, \text{ Вт/м}^2$$

$$q_3 = \tau_p v \cos \alpha, \text{ Вт/м}^2$$

$$q_B = \sigma_m v \cos(90^\circ - |\gamma_1|), \text{ Вт/м}^2$$

$$q_{n2} = \frac{\sigma_m a_1 \cos \gamma_1 \mu v}{l_2}, \text{ Вт/м}^2$$

$$q_{32} = \sigma_m v \cos \alpha_1, \text{ Вт/м}^2,$$

где q_A — интенсивность источника тепловыделения в зоне плоскости сдвига AB ; q_n — интенсивность тепловыделения от трения по передней поверхности; q_3 — интенсивность тепловыделения от трения по главной задней поверхности; q_{n2} — интенсивность тепловыделения от трения

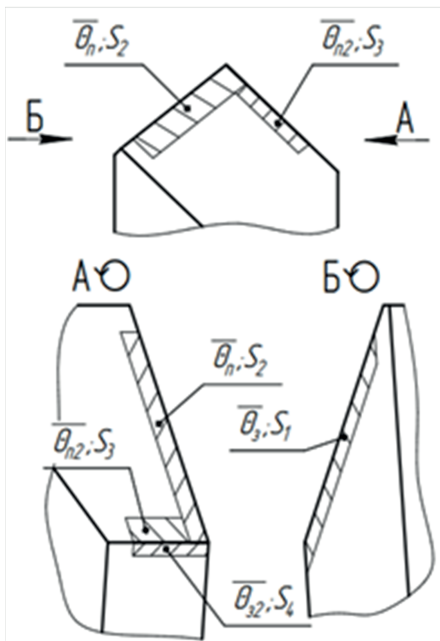


Рис. 10. Схема контактных площадок инструмента

средней интегральной температуры на контактных площадках l , l_2 , Δ и Δ_2 инструмента ДР. При расчете принималось, что средние контактные температуры на площадках инструмента $\bar{\theta}_n$, $\bar{\theta}_{n2}$, $\bar{\theta}_3$, $\bar{\theta}_{32}$ составляют такую часть от температуры резания, какую соответствующие им площади составляют от общей площади контакта инструмента с заготовкой. На схеме рис. 10 изображены средние контактные температуры на соответствующих площадках инструмента, $\bar{\theta}_n$ — средняя контактная температура на передней поверхности, $\bar{\theta}_{n2}$ — средняя контактная температура у зоны деформирующей кромки, $\bar{\theta}_3$ — средняя контактная температура на главной задней поверхности, $\bar{\theta}_{32}$ — средняя контактная температура на вспомогательной задней поверхности.

Общая площадь контакта (S) инструмента и заготовки по всем поверхностям описывается выражением:

$$S = b_1 (\Delta + l) + b_2 (\Delta_2 + l_2), \text{ мм}^2$$

Выражение общего вида для вычисления среднеинтегральной температуры ДР с учетом температуры окружающей среды, вычисляется из формулы:

$$\theta = \bar{\theta}_n \frac{b_1 l}{S} + \bar{\theta}_{n2} \frac{(b_2 - l) l_2}{S} + \bar{\theta}_3 \frac{b_1 \Delta}{S} + \bar{\theta}_{32} \frac{b_2 \Delta_2}{S} + 20, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Расчет средних температур на площадках инструмента учитывал распределение интенсивности источников с учетом особенностей процесса ДР. Выбор законов распределения источников тепловыделения базировался на работах С.С. Силина, А.Н. Резникова, А.Н. Рыкунова, В.Ф. Безъязычного.

Методика расчета температуры проверялась экспериментально при разных параметрах обработки, геометрии инструмента, на различных сталях. Измерение проводилось методом естественной термопары с использованием разработанного измерительного комплекса на базе АЦП модели NI SCXI-1102. Измерения температуры зоны ДР и обработка экспериментальных данных проходили в режиме реального времени. Регистрация экспериментальных данных, оценка значений, необходимые расчеты проводились с использованием среды графического программирования LabView. Результаты экспериментальных данных подтвердили удовлетворительную сходимость с теоретическим расчетом. Сравнение расчетных значений температуры θ_r и экспериментальных значений θ_3 при разных технологических параметрах обработки представлены на рис. 11.

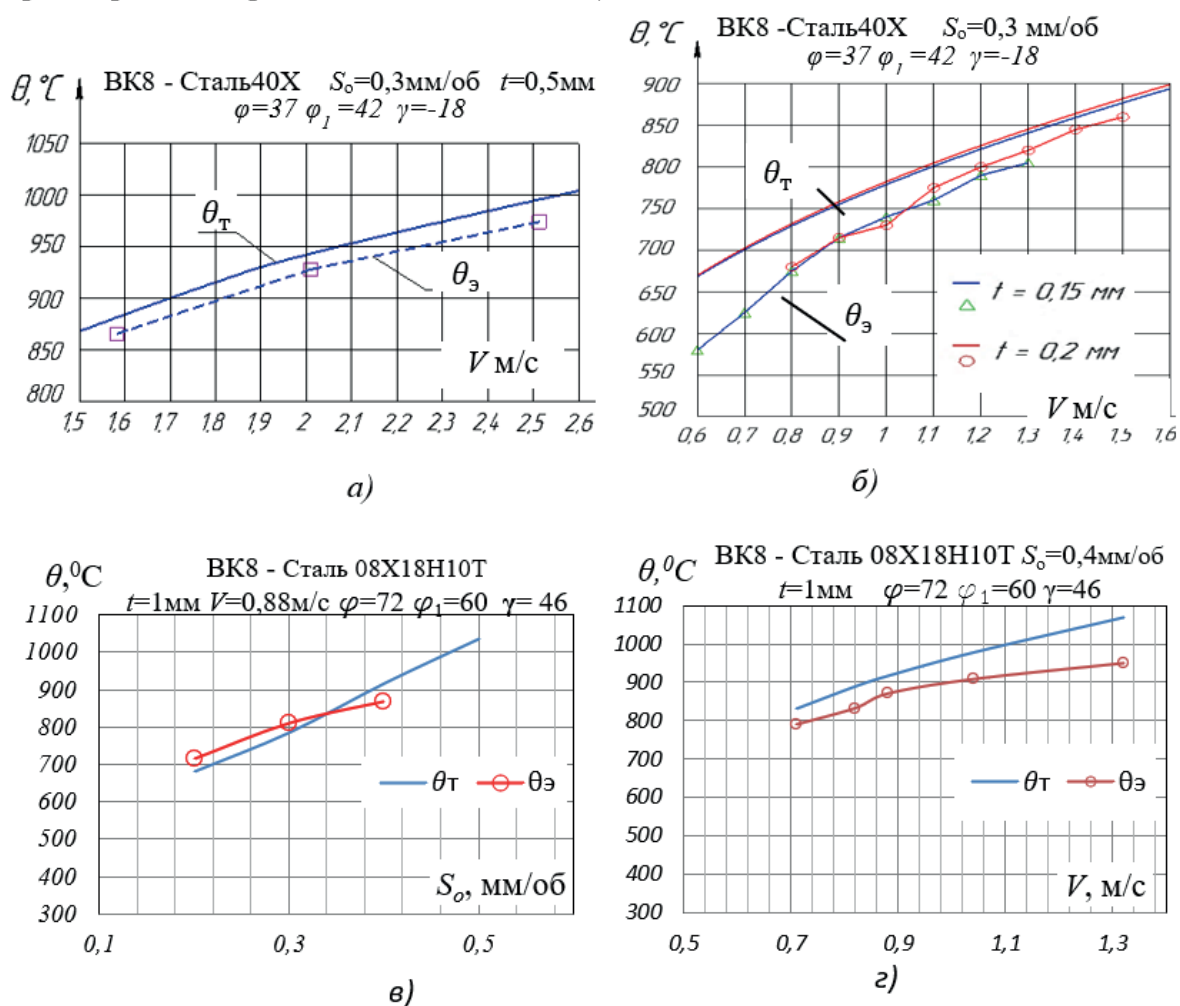


Рис. 11. Сравнение расчетных θ_T и экспериментальных θ_3 значений температуры в зоне ДР:

а, б, г — при изменении скорости; в — при изменении подачи

Анализ результатов расчета температуры показал расхождение с экспериментом в среднем на 8–12 %, в отдельных случаях до 17 %. Расхождение значений, тем не менее, дают возможность проведения анализа динамики изменения температуры, что важно для практического прогноза изменения температуры в зависимости от параметров ДР. При выборе закалочного способа упрочнения макрорельефа непосредственно ДР расчет дает прогноз достижения температур закалки макрорельефа. Экспериментальные исследования установили, что наибольшее влияние на температуру в зоне обработки оказывает скорость резания, что использовалось при получении закаленных слоев высокой твердости в получаемом макрорельефе. Возможность управления твердостью слоев макрорельефа за счет скорости резания и параметров инструмента ДР представлена на рис. 12. Так, по результатам эксперимента на стали 30ХГСА получены закаленные слои различной толщины при $S = 0,2 \text{ мм/об}$, $t = 0,4 \text{ мм}$ в зависимости от скорости резания и геометрии инструмента. При выборе варианта упрочнения температура в зоне ДР предопределяет вариант достижения необходимой твердости методом деформационного или термического воздействия. По результатам экспериментальных данных увеличение твердости слоев макрорельефа относитель-

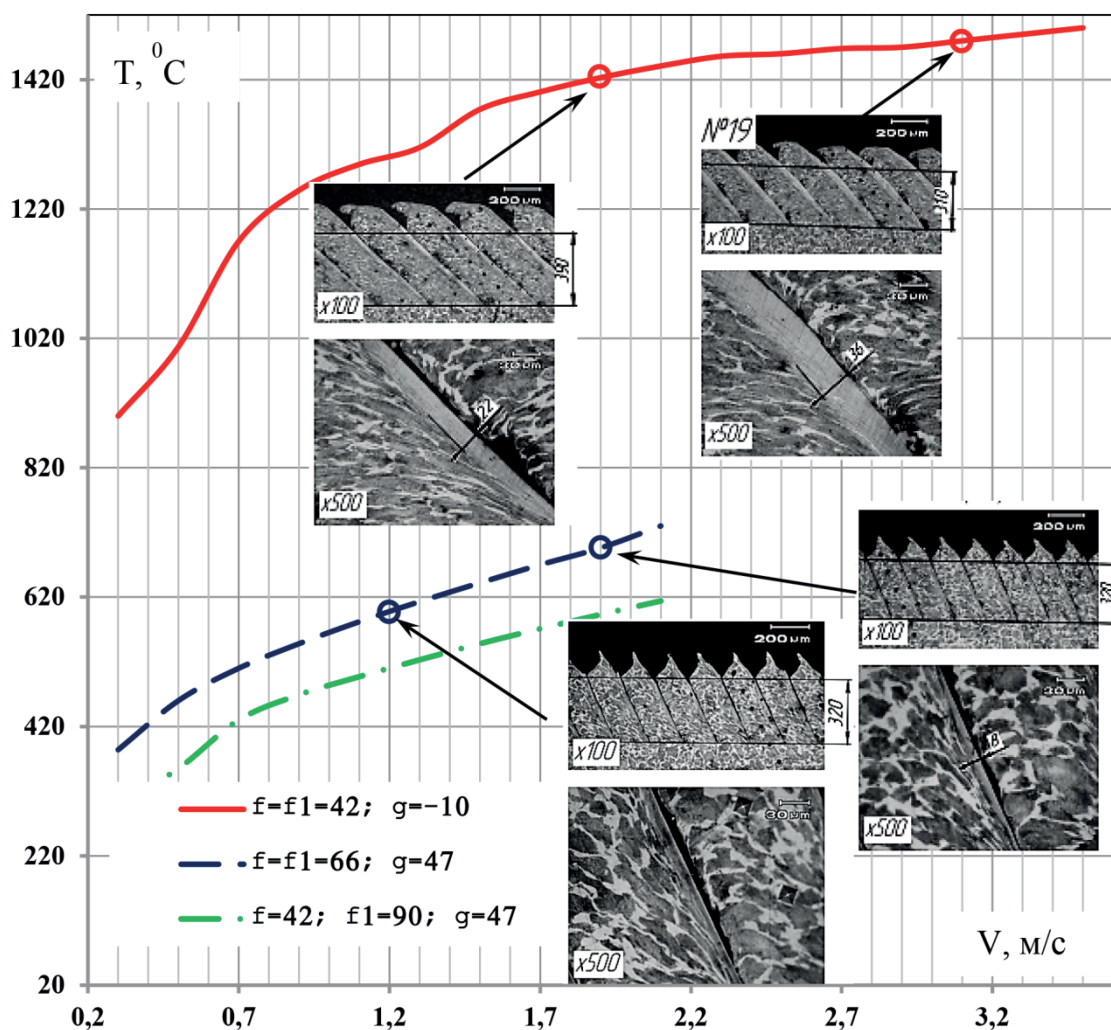


Рис. 12. Результаты управления твердостью слоев макрорельефа за счет изменения скорости резания и параметров инструмента ДР

но исходного материала заготовки составляло в среднем 42 % при сочетании углов $\varphi = \varphi_1 = 42^\circ$, в диапазоне скорости резания 1,9...3,1 м/с. В зоне белого слоя толщиной 22...36 мкм твердость в среднем составила 600...620 HV₅₀. Обнаружены так называемые белые слои при высоких скоростях и температурах в зоне резания подтверждает факт достижения температур точек фазового перехода с получением закалочных зон на прирезцовой поверхности ребра.

При сочетании углов инструмента равных $\varphi = \varphi_1 = 66^\circ$, $\gamma = 47^\circ$ уменьшение скорости обработки менее 1,9 м/с не обеспечивает температур достаточных для закалочного упрочнения.

На температуру зоны ДР влияет геометрия инструмента и теплофизические характеристики инструментального материала. При формировании макрорельефа на стали 40X при $V = 2,0$ м/с и соотношением углов $\varphi = \varphi_1 = 66^\circ$ расчетная температура составила 700 $^\circ\text{C}$, измеренная твердость прирезцовой зоны 408 HV. При соотношении углов $\varphi = \varphi_1 = 42^\circ$ расчетная температура составила 1050 $^\circ\text{C}$, измеренная твердость составила 680 HV₅₀. Расчет температуры при обработке стали 40X инструментом с различной теплопроводностью при соотношении углов $\varphi = 72^\circ$, $\varphi_1 = 60^\circ$, и $t = 0,5$ мм, $S = 0,3$ мм/об, $V = 1,5$ м/с инструментом из твердого сплава BK8 температура составила 780 $^\circ\text{C}$, из оксидной керамики температу-

ра составила 890 °С. Расчет подтвердил закономерность изменения температуры в зоне ДР при использовании инструментальных материалов с различной теплопроводностью.

В четвертой главе изложены результаты экспериментальных исследований получения поверхностных структур методом ДР на сталях.

Экспериментальные исследования проводились с целью подтверждения непосредственного использования ДР как самостоятельного технологического приема создания поверхностной структуры повышенной прочности, так и в сочетаниях с существующими методами упрочнения поверхности.

В результате непосредственного использования процесса ДР увеличивается твердость макрорельефа по всей высоте ребра, например для стали 30ХГСА при скорости $V = 0,73 \text{ м/с}$, подаче $S_0 = 0,4 \text{ мм/об}$, глубине резания $t = 0,75 \text{ мм}$, относительно основы материала твердость увеличивается в среднем на 37 % (см. рис. 13).

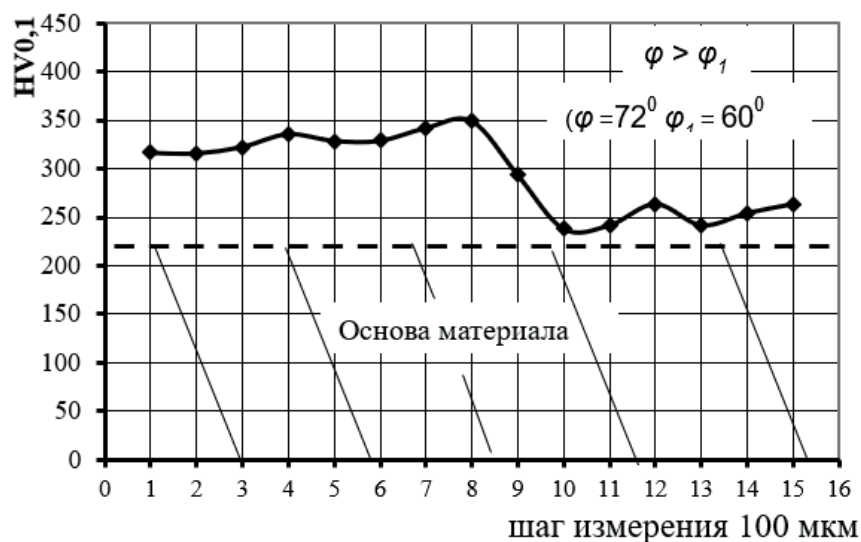


Рис. 13. Распределение микротвердости по толщине макроструктуры ДР

На рис. 14 представлен поперечный срез упрочненного слоя макрорельефа на стали 30ХГСА после ДР. Распределение твердости по толщине упрочненного слоя равномерное, общая толщина составила 0,7–0,8 мм.

Полости на поверхности трения для смазки способствуют повышению износостойкости. На рис. 15 показана созданная макроструктура для удержания смазки имеет капиллярный выход на поверхность трения. Для повышения твердости поверхности трения проводится поверхностная закалка ТВЧ.

На рис. 15 представлен срез поверхностного слоя с полостями и капиллярами для выхода смазки на стали 30ХГСА (а), и 38Х2МЮА (б) твердостью 52...56 HRC.

Регулярный макрорельеф успешно удерживает твердую смазку. На рис. 16 представлен поперечный срез с запрессованной лентой из фторопласта (Ф4) на внутренней поверхности подшипниковой втулки. Макрорельеф эффективно использовался для заполнения фторопластовой эмульсии с дисульфидом молибдена с последующей полимеризации эмульсии.

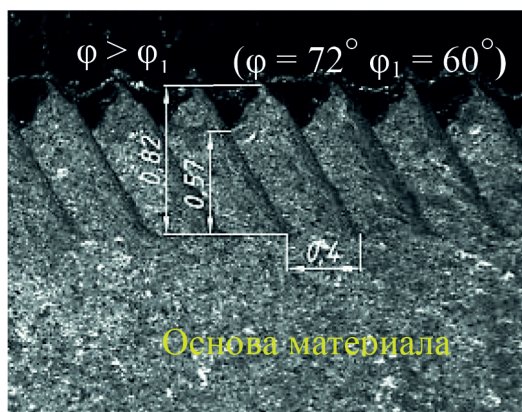


Рис. 14. Поперечный срез поверхностного слоя на стали после ДР



Рис. 16. Макроструктура с запрессованной фторопластовой лентой

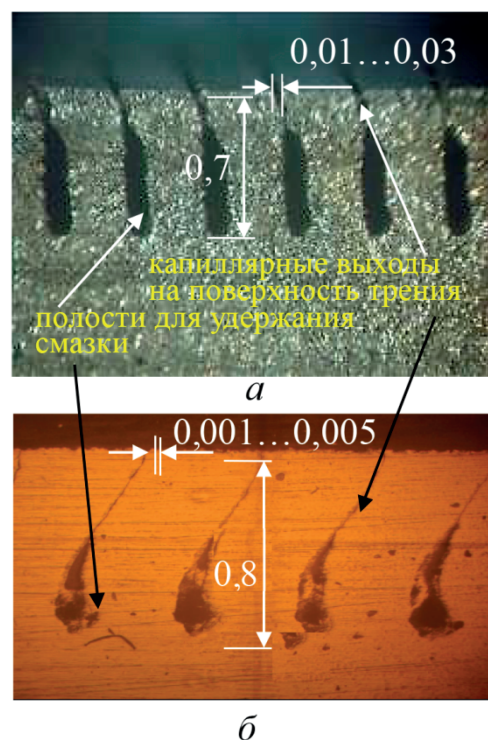


Рис. 15. Макроструктура для удержания смазки

В работе реализован новый комбинированный метод создания поверхностной структуры повышенной износостойкости путем последовательного применения процесса ДР и ХТО. Параметры макрорельефа (S_o , b , a , h_m) назначают с учетом необходимой глубины диффузионного проникновения легирующих элементов $h_{\text{диф}}$ в боковые стороны ребер макрорельефа.

На рис. 17 представлен поперечный срез поверхности вала из стали 35Х после циркуляционного алитирования. Толщина упрочненного слоя определяется глубиной сформированного макрорельефа при том же времени диффузионного насыщения. Варьируя временем диффузионного насыщения и режимами ДР получены упрочненные поверхностные структуры разных типов, пористые и без пористые полностью упрочненные, пористые и без пористые частично упрочненные.

Управляя уровнем температуры зоны ДР за счет изменения скорости резания, увеличивается нагрев слоев макрорельефа до точек фазового перехода с получением закалочных структур в макрорельефе. На токарно-винторезном станке за один проход инструмента ДР получен на стали 35 закаленный слой твердостью 60 HRC на глубину до 0,6 мм. Производительность метода закалки составила 0,1м²/мин. Метод упрочнения защищен патентом РФ.

Предварительно созданный на поверхности детали макрорельеф обеспечил прочную связь покрытия нанесенного газотермическим способ на рабочую поверхность кольца выглаживающей прошивки. На рис. 18 представлен поперечный срез кольца выглаживающей прошивки с покрытием из твердого сплава.

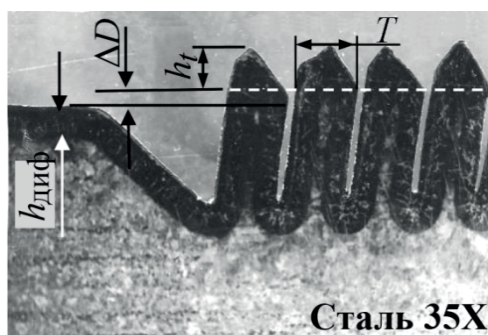


Рис. 17. Поперечный срез восстановленного вала, с последующим проведением циркуляционного алитирования

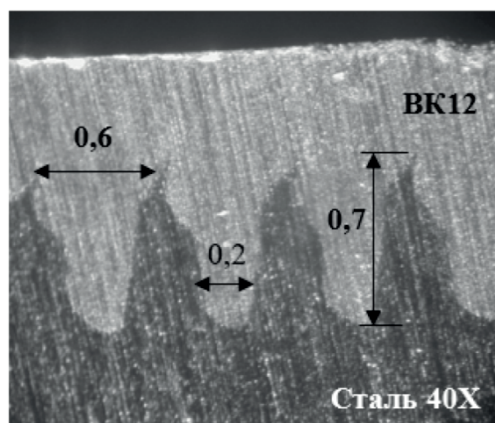


Рис. 18. Поперечный срез выглаживающей прошивки с покрытием твердого сплава BK12

Восстановление изношенной поверхности используя метод ДР позволяет увеличивать размер изношенного вала до 0,8 мм на диаметр. Проведение электроискровой обработки с одновременным легированием восстановленной поверхности вала дало возможность одновременно создать новые свойства рабочей поверхности детали.

Исследования проводились также на сталях 38Х2МЮА, 30ХГСА, 20Х13, 40Х, 35, 12Х18Н10Т широко используемых при изготовлении деталей и узлов трения. Целью исследования являлось получение устойчивого макрорельефа разной формы. Размеры макрорельефа составили: шаг 0,05...1,5 мм, высота до 1,5 мм, межреберный зазор от нулевого значения до 1,0 мм, наклон ребер к основанию до 42°.

Подтверждена возможность упрочнения макрорельефа путем: диффузионного легирования, сверхзвукового газотермического напыления твердого сплава в зазоры макрорельефа. Апробирована методика заполнения зазоров макрорельефа ремонтными составами в случаях устранения поверхностной пористости. Проведены эксперименты по созданию закаленного слоя на поверхности стального вала непосредственно используя ДР.

При использовании ДР как самостоятельного метода восстановления размеров деталей на величину ΔD , (рис. 17.), треугольное заострение вершины ребра h_t шириной T удаляется на величину $h_t = \frac{S_0}{2\sin(\varphi + \varphi_1)}$ точением или шлифованием.

Величина межреберного зазора b определяет интенсивность протекания процесса ХТО зависит от угла φ , и определяется выражением с заданной величиной b

$$\varphi = \arcsin \frac{(S_0 - b)}{\xi S_0}.$$

Максимальное восстановление размера происходит при создании пористого поверхностного слоя в виде ребер с зазором величиной

$$\Pi_s = (1 - \xi \frac{\sin \varphi}{\sin \varphi_1}) 100 \%.$$

Минимальная величина пористости для вертикального макрорельефа составляет около 23 %, несущая способность после удаления заострений составляет около 77 %. Уменьшение поверхностной пористости достигается изменением главного и вспомогательного углов инструмента в плане (см. рис. 19). Для восстановления поверхности в случае использования наклонного макрорельефа увеличение диаметральных размеров ΔD определяется из выражения на странице 10.

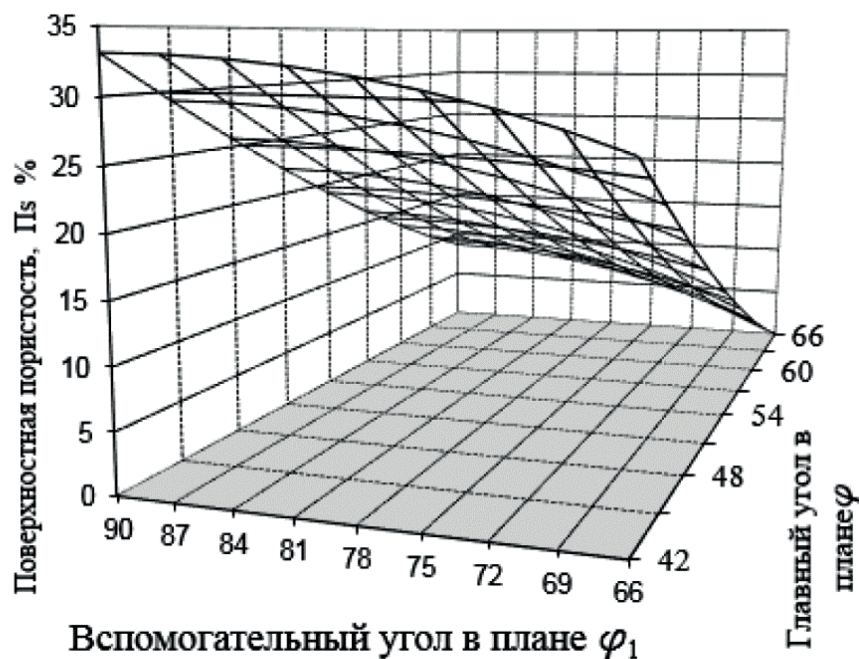


Рис. 19. Соотношение главного и вспомогательного углов в плане при оценке величины пористости

Формирование устойчивого макрорельефа определяется геометрией инструмента, свойствами обрабатываемого материала, режимами резания, механической прочностью режущей части инструмента. Стабильность ДР предполагает отсутствие отрыва слоев макрорельефа от основного материала заготовки. При соотношении глубины резания к подаче $\frac{t}{S_o} > 2 \dots 3,5$ подрезанный слой материала главной режущей кромкой теряет прочную связь с основой заготовки и сходит в виде стружки. Совокупность данных параметров определяет область существования процесса ДР. Область существования процесса ДР на стали 40Х в координатах $\frac{t}{S_o}$, показана на рис. 20.

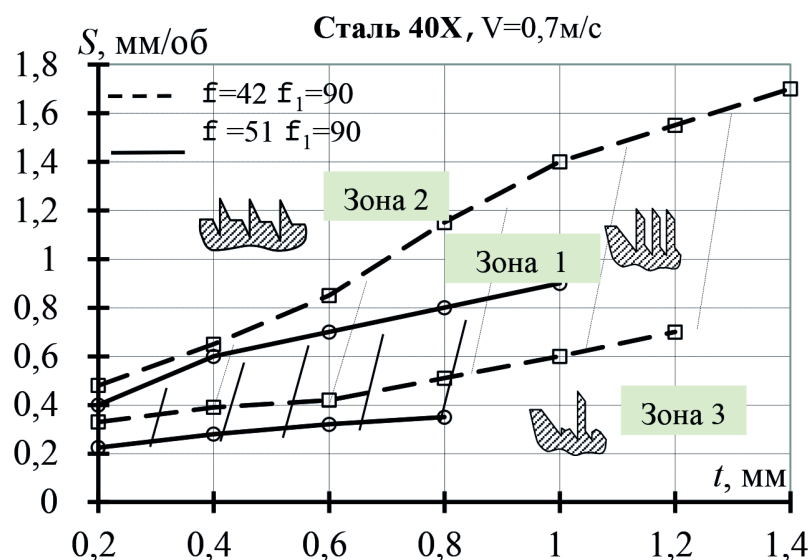


Рис. 20. Область существования ДР

1 зона — область устойчивого формообразования; 2 зона — не полное формирование макрорельефа; 3 зона — образование стружки

Исследование составляющих силы резания определило отрицательное значения составляющей силы P_x что объясняется особой геометрией режущей части инструмента ДР.

Оценка периода стойкости инструмента ДР проводилась при формировании макроструктуры на стали 40X инструментом с базовой геометрией режущей части. Критерием потери работоспособности инструмента являлось образование и срыв нароста в межреберное пространство, приводящее к искажению профиля макроструктуры. Работоспособность инструмента проводилась для выбранной скорости формирования макрорельефа. Смазывающие охлаждающие технологические среды не использовались. Максимальная стойкость инструмента составила 108 минут непрерывной работы инструмента при скорости 1,21 м/с (см. рис. 21).

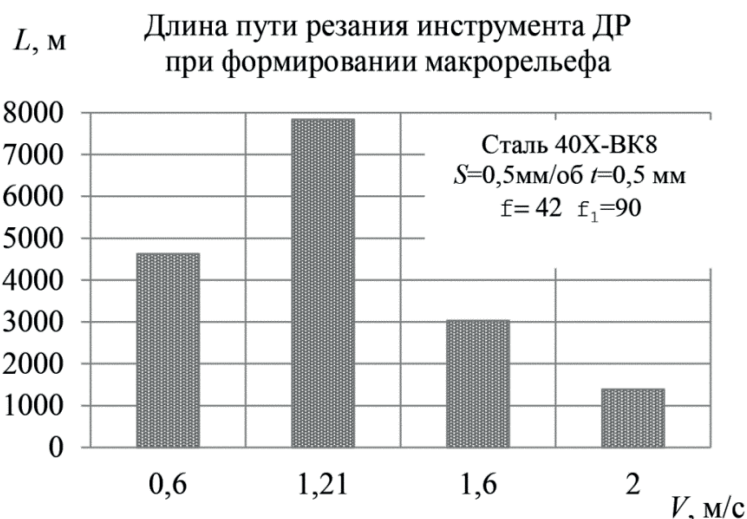


Рис. 21. Оценка периода стойкости инструмента ДР

В пятой главе исследован комплекс методов создания износостойких поверхностных структур при использовании ДР.

Разработан технологический метод создания износостойких покрытий с управляемой структурой и свойствами на основе сочетания процесса ДР и ХТО. Метод основывается на предварительном создании макрорельефа с шагом 0,1...0,5 мм, шириной каналов 5...150 мкм глубиной 0,3...1,5 мм в зависимости от типа последующей ХТО. В результате были разработаны и получены диффузионные покрытия толщиной до 1,4 мм с равномерным распределением легирующих элементов четырех основных типов упрочненных структур (рис. 22).

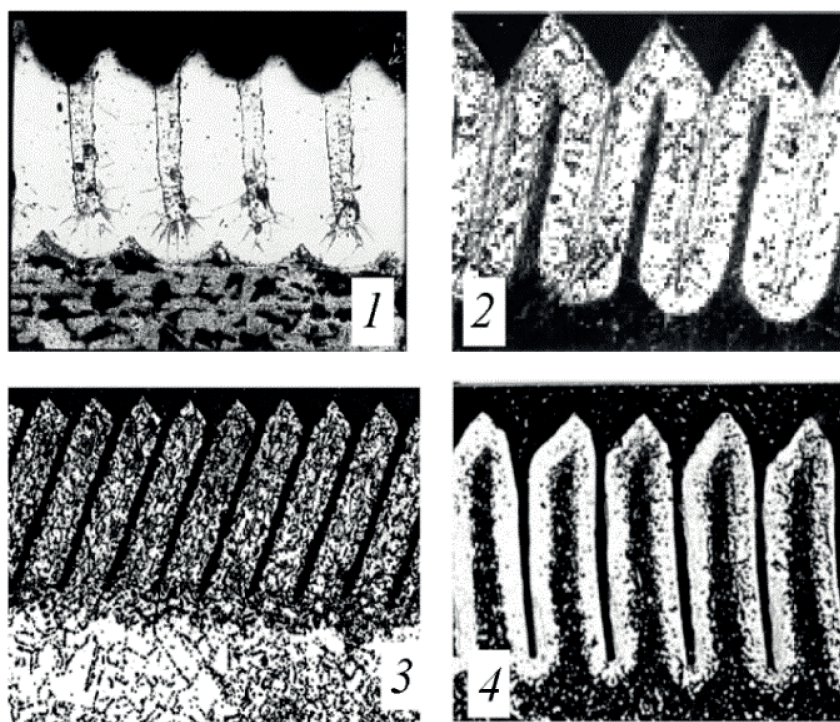


Рис. 22. Основные варианты упрочненных структур, полученных совмещением ДР и ХТО

1 — беспористые полностью упрочненные покрытия; 2 — беспористые упрочненные покрытия с мягкой прослойкой исходного материала; 3 — пористые полностью упрочненные с малым межреберным пространством; 4 — упрочненные пористые в виде малых зазоров с мягкой прослойкой исходного материала

Непосредственное использование метода ДР позволяет восстанавливать изношенные поверхности вала из конструкционных сталей до 0,8 мм. Производительность процесса восстановления практически не отличается от времени механической обработки поверхности при продольном точении. Метод восстановления целесообразно использовать для валов твердостью до 220 НВ.

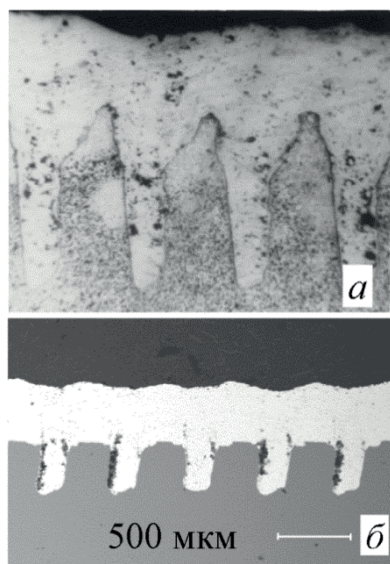


Рис. 23. Покрyтия
а — керамическое твердо-
 сплавное; *б* — покpытия
 на поверхности после ДР

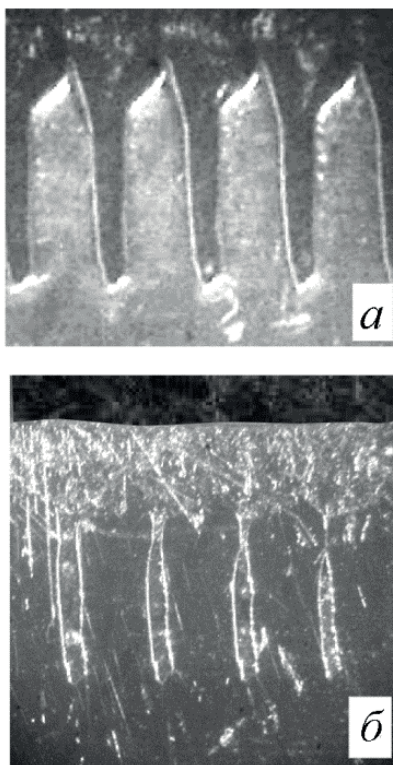


Рис. 24. Сталь 35ХМЮА
а — поверхность до на-
 варки ленты; *б* — после
 наварки

Использование покpытий является распро-
 страненным методом восстановления размеров и
 свойств поверхности. Предварительно созданный
 макрорельеф увеличивает площадь сцепления по-
 кpытия с поверхностью детали (см. рис. 23).

Перспективным решением стало создание из-
 носостойкого слоя на наружной поверхности коль-
 ца выглаживающей прошивки из стали 40Х. На
 подготовленную ДР поверхность с шагом структу-
 ры 0,6 мм, высотой 0,7 мм, ширина межреберного
 зазора 0,2 мм, наносилось покpытие из твердого
 сплава ВК12 методом сверхзвукового газопламен-
 ного напыления.

Апробирован способ приварки металлической
 ленты на поверхность, подготовленную ДР для
 восстановления изношенного участка вала тепло-
 энергетического оборудования. Сварка осуществ-
 лялась пропусканием электрического тока через
 силовой контакт ролика с оребренной поверхно-
 стью детали (см. рис. 24).

Комплекс решений непосредственного исполь-
 зования деформирующего резания для создания из-
 носостойких структур путем термомеханического и
 деформационного упрочнения с введением смазок в
 структуру поверхности описан выше.

Оценочные испытания на износостойкость
 комбинированного метода упрочнения поверхности
 с предварительно созданным макрорельефом и по-
 следующей низкотемпературной нитроцементации
 показали повышение относительной износостойко-
 сти стали 40Х в 1,5...2,1 раза, с уменьшением
 склонности к образованию задиров в 2,3...3,2 раза
 по сравнению с поверхностью без макрорельефа.

Сравнительные испытания образцов с гладкой
 поверхностью и подготовленной ДР до проведения
 ХТО показали выше износостойкость поверхности,
 подготовленной методом ДР по сравнению с глад-
 кой (см. рис. 25).

Испытания образцов пар трения имитирую-
 щих тяжело нагруженный подшипник скольжения

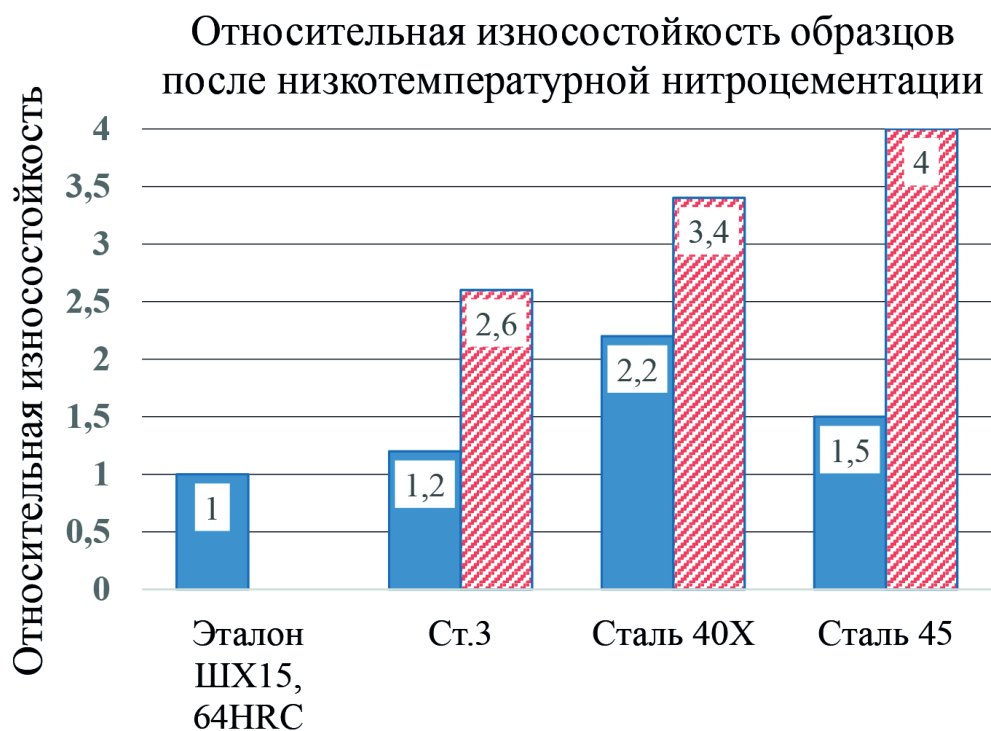


Рис. 25. Сравнительные испытания образцов после ХТО

проводились при ступенчатом повышении нагрузки. Критерием работоспособности являлось количество циклов колебательно-вращательного движения до появления задира. Образцы 6,7 подготовленные ДР с последующей нитроцементацией с введением твердой смазки (6) и без (7) показали максимальный ресурс при максимальной удельной нагрузке (см. рис. 26).

В шестой главе представлены результаты использования метода получения поверхностных структур повышенной износостойкости на основе ДР.

Разработан метод создания упрочненного слоя на поверхности направляющей колонки листового штампа. Метод основан на предварительном создании макрорельефа с последующим проведением вакуумной цементации и закалки. Макрорельеф состоял из плотных слоев высотой 1,3 мм. За счет создания макроструктуры время вакуумной цементации сократилось с 15-20 часов до 4-6 часов, что позволило снизить энергозатраты на проведение ХТО. После проведения закалки на поверхности колонки из стали 20 был получен равномерный по твердости слой величиной 1,0-1,2 мм твердостью 600-650 HV_{0,1}. Разработанная технология подтверждена возможностью использования на предприятии ПК «Салют» АО «ОДК».

Разработан метод удержания на поверхности трения терморасширенного графита в качестве твердосмазочного материала для узлов трения скольжения, используемых на предприятии ООО «Силур».

Проведены работы по восстановлению шейки вала под уплотнение насоса 20A18x5 на предприятии ОАО «Мосэнерго» ГАЭС, г. Загорска. Восстановле-

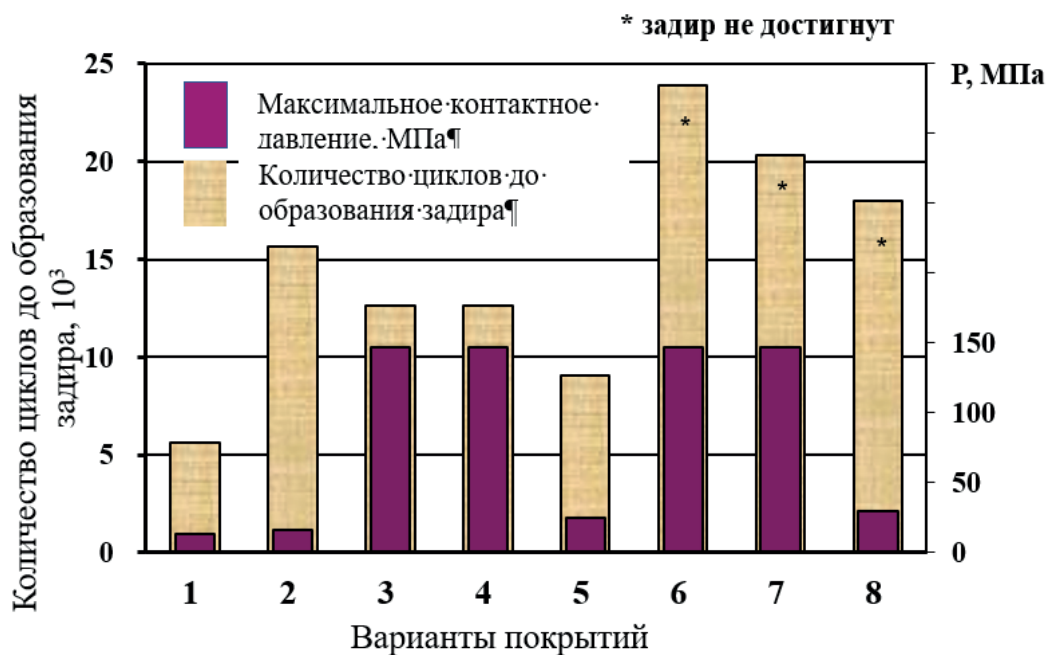


Рис. 26. Количество циклов колебательно-вращательного движения до появления задира:

1 — базовый вариант (вал — индукционная закалка, втулка — газовая цементация и индукционная закалка); 2 — карбонитрация; 3 — плазменно-напыленное твердосплавное покрытие, вариант *a*; 4 — плазменно-напыленное твердосплавное покрытие, вариант *b*; 5 — гальваническое покрытие (твердым хромом); 6 — низкотемпературная нитроцементация макрорельефа (ДР) с введением твердой смазки в состав покрытия; 7 — низкотемпературная нитроцементация макрорельефа (ДР) без введения твердой смазки; 8 — электроискровое легирование

ние изношенной поверхности вала диаметром 83,0 мм длиной 1280 мм из стали 40 проходило с использованием ДР путем формирования макрорельефа шагом 0,6 мм высотой 0,94 мм с последующим нанесением ремонтного состава Belzona 1311 Керамик R-Метал.

Проведены испытания цевок на предприятии ТЭЦ-21 ОАО Мосэнергоремонт, упрочненных комбинированным методом ДР+ХТО. На рабочей поверхности цевки из стали 12Х1МФ в количестве 24 штук сформирован макрорельеф шагом 0,6 мм высотой 1,0 мм шириной межреберного зазора 0,19 мм. Последующее низкотемпературное карбонитрирование проводилось по технологии ОАО НИИСПК при температуре 580 °С выдержкой 2 часа. Для снижения коэффициента трения в межреберный зазор внесена твердая тефлоновая смазка «Pingo» (Германия). Общая толщина упрочненного слоя составила 0,8 мм. Испытания подтвердили работоспособность созданного покрытия на поверхности трения во время эксплуатации в условиях высоких контактных нагрузок и ограниченной смазки. Плановые контрольно-профилактические работы, проведенные через 11 месяцев работы узла трения, подтвердили работоспособ-

ность износостойкого покрытия без выявления на поверхности 24 цевок забоин, вмятин, локальных пятен износа и других повреждений.

Проведена работа по использованию метода ДР при создании самосмазывающего износостойкого покрытия на внутренней поверхности втулки подшипника скольжения из стали 40Х для узла поворотного механизма экскаватора концерна «Сарекс». Обработка внутренней поверхности втулок заключалась в формировании макрорельефа с шагом 0,35 мм высотой рельефа 0,7 мм шириной межреберного зазора 0,1...0,15 мм методом ДР с последующей ХТО по технологии НИИСПК с заполнением межреберного пространства твердой смазкой на основе фторопласта 4МД и суспензией ВНИИ НП229.

Проведены производственные испытания выглаживающей прошивки, изготовленной по новой технологии при совмещении деформирующего резания и сверхзвукового газотермического напыления твердого сплава. Целью испытания являлась оценка работоспособности колец выглаживающей прошивки, изготовленных по технологии формирования твердосплавного покрытия на наружной поверхности 12 колец из стали 40Х, взамен цельных колец диаметром 30 мм из твердого сплава ВК8. Критерием работоспособности являлся размерный износ колец при обработке отверстий в балке передней оси автомобиля. Нанесение твердого сплава на поверхность колец осуществлялось методом сверхзвукового газопламенного напыления на установке СГН1, разработанной на кафедре Э1 МГТУ им Н.Э. Баумана. Материалом для напыления являлся порошок Sulzer Metco Diamalloy 2004 с содержанием WC-88 %, кобальта Co-12 %, размером частиц 11...45 мкм. В результате испытаний, проведенных на предприятии АМО ЗИЛ, выглаживающая прошивка успешно обработала отверстия в 184 балках передней оси автомобиля.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Разработан комплекс технологических решений на основе метода ДР для создания упрочненных поверхностных структур, заключающийся в использовании метода ДР как самостоятельного метода упрочнения, так и в его сочетании с последующими методами повышения износостойкости, такими как химико-термическая обработка, газотермическое напыление покрытий, электроискровое легирование, внесение твердосмазочных материалов в структуру поверхностного слоя.

2. Создана методика расчета температурного и силового взаимодействия инструмента с обрабатываемым материалом в зоне резания, позволяющая определить сочетания и ограничения технологических параметров процесса для получения макроструктур заданных параметров на сталях.

3. Совокупность особенностей макрорельефа, получаемого ДР, и возможностей химико-термической обработки позволила реализовать получение новых упрочняющих структур композиционного строения (патент РФ №2015202) толщиной до 1,5 мм: Доказана равномерность распределения легирующих элементов и твердости по всей толщине упрочненного слоя.

4. Разработана методика выбора геометрических характеристик макрорельефа и назначения параметров ДР его получения для последующего диффузи-

онного легирования химико-термической обработкой. Апробировано упрочнение поверхностей сталей: 20, 35X, 40X, 45X, 20X13, 12X18H10T, 12X1MF при циркуляционном алитировании, цементации, нитроцементации, борировании. Совмещение метода ДР и последующей низкотемпературной нитроцементации обеспечило повышение относительной износостойкости стали 40X в 1,5...2,1 раза, уменьшение склонности к образованию задиров в 2,3...3,2 раза по сравнению с нитроцементацией поверхностей без макрорельефа.

5. Обоснован и реализован метод упрочнения поверхности незакаливаемых материалов, в том числе коррозионностойких сталей аустенитного класса с увеличением твердости на 50...80 % на глубину до 1,5 мм непосредственно ДР за счет деформационного упрочнения материала подрезаемого слоя и формирования беспористого оребрения.

6. Научно обоснован, экспериментально подтвержден и запатентован способ закалочного упрочнения методом ДР стальных валов простой формы (патент РФ №2556897). Обоснованы режимы и геометрические параметры инструмента ДР, обеспечивающие получение твердости до 63 HRC при глубине упрочненного слоя до 0,8 мм. Скорость резания более 4 м/с и подача менее 0,1 мм/об являются основными факторами, определяющим получаемую твердость.

7. Обоснован метод восстановления посадочных размеров и свойств поверхности валов методом ДР с увеличением диаметральных размеров до 0,5 мм. Установлена совокупность технологических параметров и требования к инструменту, позволяющих реализовывать разработанный метод на практике. Метод внедрен при восстановлении посадочных мест крупногабаритных валов энергетического оборудования в АО «Мосэнергоремонт».

8. Разработаны рекомендации по созданию поверхностей трения, содержащих твердосмазочные компоненты в структуре упрочненного слоя. Введение твердых смазок (терморасширенный графит, дисульфид молибдена, фторопласт Ф4). Интенсивность изнашивания стали 40X после карбонитрации с фторопластом Ф4 в структуре поверхности трения меньше в 3,5 раза при снижении коэффициента трения в 2,9–3,1 раза по сравнению с образцом без твердой смазки.

9. Проведена апробация разработанных методов на восьми промышленных предприятиях для упрочнения колонн вырубных штампов, восстановления размеров и свойств поверхности крупногабаритных валов и механизма цевочного зацепления энергетического оборудования, узла трения поворотного механизма экскаватора, повышения износостойкости внутренней конической поверхности крупногабаритных деталей запорной нефтеперекачивающей аппаратуры.

Основные публикации по теме диссертации

Публикации в периодических изданиях, рекомендованные ВАК РФ

1. Исследование неоднородных деформаций кристаллических решеток при деформирующем резании образцов стали 08х18н10т с периодическим рельефом поверхности /С.Г. Васильев [и др.] // Кристаллография. 2025. Т. 70. № 1. с. 90–96. (0,57 п. л. / 0,14 п. л.)

2. Особенности фазово-структурного состояния углеродистых сталей, обработанных методом деформирующего резания /С.Г.Васильев [и др.] // Металлург. 2022. № 3. с. 22–27. (0,53 п. л. /0,13 п. л.)
3. Зубков Н.Н., Васильев С.Г., Цуканов Д.В. Деформирующее резание как основа создания самосмазывающихся узлов трения скольжения // Технология металлов. 2021. № 5. с. 37–43. (0,47 п. л. / 0,16 п. л.)
4. Влияние содержания углерода на структуру и микротвердость сталей при скоростном воздействии деформирующим резанием / Васильев С.Г. [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. 2020. № 2 (776). с. 65–71. (0,57 п. л. / 0,11 п. л.)
5. Васильев С.Г., Шуляк Я.И. Температура зоны механической обработки при формировании упрочненного слоя методом деформирующего резания. Известия высших учебных заведений // Машиностроение. 2019. № 4 (709). с. 3–10. (0,48 п. л. / 0,24 п. л.)
6. Особенности изменения теплоемкости стали у8 после закалки деформирующим резанием при ее нагреве до 400 °С / С.Г.Васильев [и др.] // Электрометаллургия. 2018. № 7. с. 20–25. (0,4 п. л. / 0,1 п. л.)
7. Оценка триботехнических характеристик стали 40Х после закалки деформирующим резанием / С.Г.Васильев [и др.] // Инженерный журнал: наука и инновации. 2017. №11 (71). с. 6. (0,65 п. л. / 0,12 п. л.)
8. Шуляк Я.И., Васильев С.Г. Модернизация установки измерения сил резания на базе динамометра УДМ-600 // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. 2016. № 1. с. 1–12. (0,5 п. л. / 0,25 п. л.)
9. Кельдиева И.А., Васильев С.Г. Химико-термическая обработка модифицированных поверхностных структур на титановых сплавах // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. 2016. № 4. с. 14–24. (0,63 п. л./0,31 п. л.)
10. Зубков Н.Н., Овчинников А.И., Васильев С.Г. Особенности силового взаимодействия заготовки и инструмента для деформирующего резания // Вестник машиностроения. 2015. № 12. с. 68–71. (0,25 п. л./0,1 п. л.)
11. Зубков Н.Н., Васильев С.Г. Повышение износостойкости деталей пар трения скольжения на основе метода деформирующего резания // Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. № 8 (104). с. 3–9. (0,6 п. л./0,3 п. л.)
12. Васильев С.Г., Шуляк Я.И. Изменение твердости поверхности детали методом механической обработки // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2011. № 11. с. 77–82. (0,36 п. л./0,2 п. л.)
13. Васильев С.Г., Попцов В.В. Повышение твердости поверхности детали термическим воздействием с использованием деформирующего резания // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2011. № 12. с. 37–43. (0,4 п.л./0,2 п. л.)
14. Зубков Н.Н., Кременский И.Г., Васильев С.Г. Восстановление изношенных поверхностей с использованием металлорежущего оборудования // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2002. № 12. с. 13–17. (0,3 п. л./0,1 п. л.)

15. Зубков Н.Н., Богомолов А.М., Васильев С.Г. Восстановление размеров и свойств поверхности изношенных деталей // Практика противокоррозионной защиты. 2001. № 4 (22). с. 17–22. (0,31 п. л./0,1 п. л.)

16. Кременский И.Г., Зубков Н.Н., Васильев С.Г. Восстановление посадочных мест валов на металлорежущем оборудовании // Технология металлов. 2001. № 4. с. 22–24. (0,2 п. л./0,06 п. л.)

17. Механо-химико-термическая обработка поверхности деталей машин / С.Г. Васильев [и др.] // Вестник машиностроения. 1993. № 7. с. 32–35. (0,25 п. л./0,05 п. л.)

Публикации в изданиях индексируемые в Scopus или WoS

18. Aspects of The Phase-Structural State of Carbon Steels Processed by Deformation Cutting. Vasil'ev S.G. [et al.], Metallurgist. 2022. V. 66. № 3, 4. P. 255–261. (0,4 п. л./0,1 п. л.)

19. Deformational Cutting as a Basis For Creating Self-Lubricating Sliding Friction Units. Zubkov N.N., Vasil'ev S.G., Tsukanov D.V. Russian Metallurgy (Metally). 2021. V. 2021. № 13. P. 1786–1791. (0,31 п. л./0,1 п. л.)

20. Effect of Carbon Content on The Structure and Microhardness of Steels Under Rapid Action by Deforming Cutting. Vasil'ev S.G. [et al.], Metal Science and Heat Treatment. 2020. V. 62. № 1, 2. P. 168–173. (0,31 п. л./0,06 п. л.)

21. Changes in the Specific Heat of U8 Steel after Quenching by Deforming Cutting During its Heating to 400°C. Vasil'ev S.G. [et al.]. Russian Metallurgy (Metally). 2019. V. 2019. № 6. P. 624–628. (0,25 п. л./0,06 п. л.)

22. Зубков Н.Н., Васильев С.Г., Попцов В.В. Особенности закалочного деформирующего резания // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2018. Т. 20. № 2. с. 35–49. (1,01 п. л./0,34 п. л.)

23. Steel Case Hardening Using Deformational Cutting. Vasiliev S.G. [et al.]. Journal of Manufacturing Science and Engineering. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers. 2018. V. 140. № 6. P. 061013. (0,22 п. л. / 0,05 п. л.)

24. New Method of Quench Surface Turning. Zubkov N.N., Vasilev S.G., Poptcov V.V. Solid State Phenomena. 2017. V. 265. P. 696–701. (0,31 п. л./0,1 п. л.)

25. Tool–workpiece Interaction in Deformational Cutting. Zubkov N.N., Ovchinnikov A.I., Vasil'ev S.G. Russian Engineering Research. 2016. V. 36. № 3. P. 209–212. (0,2 п. л./0,06 п. л.)

Патенты

1. Способ поверхностного закалочного упрочнения режуще-деформирующим инструментом. Зубков Н.Н., Васильев С.Г., Попцов В.В. Патент на изобретение RU 2556897 C1, 20.07.2015. Заявка № 2014101642/02 от 21.01.2014.

2. Способ упрочнения поверхности детали. Зубков Н.Н., Овчинников А.И., Васильев С.Г., Симонов В.Н., Хасянов М.А. Патент на изобретение RU 2015202 C1, 30.06.1994. Заявка № 5025701/02 от 04.02.1992.