

005533798

На правах рукописи

КУЗНЕЦОВ Виктор Павлович

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ
НАНОСТРУКТУРИРУЮЩЕГО ВЫГЛАЖИВАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ
ПРЕЦИЗИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ**

05.02.07 Технология и оборудование
механической и физико-технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

3 ОКТ 2013

Томск – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Курганский государственный университет»

Научный консультант: член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор *Псахье Сергей Григорьевич*

Официальные оппоненты:

Мазеин Петр Германович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет» (Национальный исследовательский университет), г. Челябинск

Шаркеев Юрий Петрович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией физики наноструктурных биокomпозитов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск

Бутенко Виктор Иванович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры механики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Таганрогский технологический институт» Южного федерального университета, г. Таганрог

Ведущая организация: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана»*

Защита диссертации состоится «23» декабря 2013 г. в 14 час. на заседании диссертационного совета Д 003.038.02 при ИФПМ СО РАН по адресу: 634055, г. Томск, пр. Академический, 2/4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФПМ СО РАН

Автореферат разослан «16» сентября 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук, профессор



В.И.Данилов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Приоритетным направлением повышения эффективности машиностроительного производства является развитие инновационных технологий изготовления деталей, обеспечивающих уникальные эксплуатационные свойства и позволяющих создавать высоконадежные и конкурентоспособные машины и оборудование. При этом первостепенная проблема состоит в разработке методов финишной обработки поверхностных слоев прецизионных деталей. Согласно современным знаниям о природе прочности и износе конструкционных материалов, определяющее влияние на ресурс изделий оказывает структурно-фазовое состояние тонкого поверхностного слоя. В связи с этим перспективным направлением развития инженерии поверхности является разработка методов и технологий формирования наноструктурного состояния в поверхностном слое при серийном изготовлении прецизионных деталей на обрабатывающих центрах, что обуславливает актуальность теоретических исследований и промышленной реализации наноструктурирующего выглаживания.

Выглаживание как процесс отделочно-упрочняющей обработки поверхностной пластической деформацией изучалось без учета влияния силы трения и современного представления о механизмах и условиях формирования нанокристаллических структур интенсивной пластической деформацией сдвига. Для реализации наноструктурирующего выглаживания в условиях повышения тринционно-силового нагружения поверхностного слоя и тенденции развития технологий многоцелевой обработки прецизионных деталей ключевым вопросом становится инструментальное обеспечение процесса. Решение данного вопроса базируется на теоретическом обосновании выбора инструментального материала индентора и конструктивного исполнения инструмента, позволяющих, с одной стороны, реализовать интенсивную пластическую деформацию сдвига, с другой, – обеспечить температурное состояние поверхностного слоя и динамическую устойчивость процесса.

Диссертационная работа выполнена по критической технологии получения и обработки конструкционных наноматериалов в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы». Основные научные результаты получены в рамках проекта «Научные основы создания наноструктурированных прецизионных стальных поверхностей с улучшенными функциональными свойствами» при поддержке гранта РФФИ 11-08-01025-а и проекта III.20.2 Программы фундаментальных исследований СО РАН 2010-2012 гг. «Разработка научных принципов формирования объемных неравновесных ультрамелкозернистых и нанофазных металлических материалов на основе многоуровневого подхода методами интенсивной пластической деформации».

Объект исследований: технология наноструктурирующего выглаживания поверхностных слоев конструкционных сталей, реализуемая при серийной обработке прецизионных деталей на металлообрабатывающих центрах и обеспечивающая кратное повышение эксплуатационных свойств.

3 87

Предмет исследований: закономерности пластического структурообразования и формирования качества поверхностного слоя во взаимосвязи с параметрами технологических режимов наноструктурирующего выглаживания и инструмента для его реализации.

Цель работы: теоретическое обоснование наноструктурирующего выглаживания как метода интенсивной пластической деформации сдвига и высокопроизводительной финишной технологии формирования поверхностных слоев с наноструктурным состоянием и субмикрорельефом, обеспечивающей при серийной обработке прецизионных деталей из конструкционных сталей кратное повышение эксплуатационных свойств.

Задачи диссертационного исследования:

1. Теоретическое обоснование управления пластическим структурообразованием поверхностного слоя во взаимосвязи с технологическими параметрами наноструктурирующего выглаживания.

2. Разработка теоретических основ моделирования динамики и теплофизики наноструктурирующего выглаживания для управления скоростью обработки в условиях повышенного фрикционно-силового нагружения поверхностного слоя.

3. Создание инструмента для реализации высокопроизводительного наноструктурирующего выглаживания при серийной обработке прецизионных деталей из конструкционных сталей.

4. Исследование технологических возможностей наноструктурирующего выглаживания для выявления закономерностей формирования высококачественного поверхностного слоя и установления возможностей кратного повышения эксплуатационных свойств деталей.

5. Разработка методических основ определения эффективных режимов пластического структурообразования по критериям качества наноструктурированного слоя и трудоемкости процесса.

Методы исследования. Решение поставленных задач выполнялось в рамках теоретических и экспериментальных исследований. Теоретические исследования базировались на основных положениях механики сплошных сред, физической мезомеханики, теплофизики, нелинейной динамики систем, технологии машиностроения и обработки металлов пластическим деформированием. В теоретических исследованиях применялись методы численного моделирования с использованием программного пакета ANSYS/LS-DYNA и специализированной системы визуального моделирования VisSim. При физическом моделировании процесса тестовые образцы и детали обрабатывались на токарно-фрезерных центрах Okuma Multus 300W, Takisawa EX-310 и других.

Достоверность результатов экспериментальных исследований и обоснованность выводов обеспечивались использованием комплекса современных методов с применением сертифицированного оборудования и приборов. Электронно-микроскопическое исследование поверхностных слоев осуществлялось с использованием просвечивающего микроскопа JEOL JEM-2100, а также сканирующих микроскопов высокого разрешения Tescan Mira 3 LMU с автоэмиссионным катодом Шоттки высокой яркости и AURIGA CrossBeam. Субмикро-

и нанорельеф обработанных поверхностей исследовался с помощью оптического профилометра Wyko NT-1100, микротвердость измерялась на приборах Leica VMHT и EcoHARD XM1270. Кинетическое микроидентифицирование образцов проводилось на измерительной системе Fischerscope HM2000 XYm согласно стандарту ISO 14577. Рентгенографические исследования выполнялись на дифрактометре Shimadzu XRD-7000.

На защиту выносятся:

1. Принципы и параметры управления пластическим структурообразованием поверхностного слоя конструкционных сталей наноструктурирующим выглаживанием.

2. Методология решения задач комплексного управления пластическим структурообразованием, скоростью обработки и синтезом инструмента по критериям качества наноструктурированного слоя и трудоемкости процесса.

3. Математическая модель динамики наноструктурирующего выглаживания и метод обеспечения динамической устойчивости процесса и параметрического синтеза демпфирующего узла инструмента на основе имитационного моделирования.

4. Теплофизическая модель наноструктурирующего выглаживания и методический подход к построению теплоотводящей системы инструмента для повышения скорости обработки и производительности процесса.

5. Методы исследования технологических возможностей процесса и установленные закономерности повышения качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей.

6. Методический подход к определению взаимосвязи параметров управления пластическим структурообразованием наноразмерных кристаллитов с параметрами качества поверхностного слоя и трудоемкостью процесса.

Личный вклад автора. Диссертационная работа является результатом обобщения многолетних исследований, основная часть которых выполнена лично автором, а часть – в соавторстве с сотрудниками кафедры автоматизации производственных процессов Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Курганский государственный университет» (КГУ) и научно-исследовательских лабораторий ООО «Предприятие «Сенсор» г. Курган, Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института машиноведения Уральского отделения Российской академии наук (ИМАШ УрО РАН), г. Екатеринбург, Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН), г. Томск.

Личный вклад автора состоит в создании патентозащищенных способов финишной обработки деталей на основе наноструктурирования поверхностного слоя, постановке задач работы и методов их решения, разработке программы теоретических и экспериментальных исследований процесса и синтеза инструмента для его реализации, анализе и научном обосновании результатов, формулировке выводов и защищаемых положений.

Научная новизна работы заключается:

- в создании комплекса теоретических и экспериментальных методов решения задач управления пластическим структурообразованием и скоростью обработки по критериям качества наноструктурированного слоя и трудоемкости процесса;
- в обосновании параметров и критериев управления эффективностью пластического структурообразования поверхностного слоя наноструктурирующим выглаживанием;
- в разработке математической модели нелинейной динамики наноструктурирующего выглаживания, устанавливающей взаимосвязь масштабного коэффициента пластического структурообразования и технологических параметров процесса с развитием автоколебаний индентора и позволяющей определять параметры демпфирующего узла инструмента;
- в разработке теплофизической модели процесса, учитывающей специфику теплопередачи в обрабатываемом материале и инструменте и позволяющей устанавливать взаимосвязь максимальной температуры в очаге деформации со скоростью выглаживания и параметрами теплоотводящей системы;
- в установлении закономерностей формирования физико-механических и структурных свойств поверхностного слоя во взаимосвязи с параметром эффективности пластического структурообразования.

Научная и практическая значимость работы. Научная ценность выполненной работы определяется полученными новыми знаниями о финишной технологии наноструктурирующего выглаживания поверхностных слоев низкоуглеродистых сталей и инструменте для его реализации, которые могут быть положены в основу дальнейшего развития науки о методах нанообработки поверхностей деталей из конструкционных сталей и создании новых технологических процессов. Разработанный технологический процесс финишной обработки используется при выполнении фундаментальных исследований наноструктурированных стальных поверхностей в КГУ, ИМАШ УрО РАН, ИФПМ СО РАН.

Практическая ценность заключается в создании патентозащищенного инструмента и разработке технологии наноструктурирующего выглаживания поверхностных слоев конструкционных материалов, позволяющих обеспечить высокий уровень износостойкости и усталостной выносливости прецизионных деталей при серийной обработке на металлообрабатывающих центрах и создавать высоконадежное оборудование и машины в нефтяном и транспортном машиностроении, теплоэнергетике.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на 18 конференциях, в том числе на 9-й Международной научно-практической конференции «Инженерия поверхности и реновация изделий» (Киев, 2009 г.), 11-й Международной научно-практической конференции «Ресурсосберегающие технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня» (Санкт-Петербург, 2009 г.), X Международной научно-практической конференции «Кибернетика и высокие технологии XXI века» (Воронеж, 2009 г.), Международной научно-практической конференции «Инно-

вационные технологии в машино- и приборостроении» (Омск, 2010 г.), Международной научно-технической конференции «Современные материалы и технологии в машиностроении» (Москва, 2010 г.), 11-м Международном станкостроительном форуме «Современные тенденции в технологиях и конструкциях металлообрабатывающих машин и механизмов (Москва, 2010 г.), VI Всероссийской конференции «Механика микронеоднородных материалов и разрушение» (Екатеринбург, 2010 г.), IX Международной научно-технической конференции «Инновация, экология и ресурсосберегающие технологии» (Ростов-на-Дону, 2010 г.), V Международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиностроения» (Томск, 2010 г.), Международной научно-технической конференции «Инновационные технологии в автоматизированном машиностроении и арматуростроении» (Курган, 2010 г.), V Российской научно-технической конференции «Ресурс и диагностика материалов и конструкций» (Екатеринбург, 2011 г.), 12-ом Международном станкостроительном форуме «Современные тенденции в технологии и конструкциях металлообрабатывающего оборудования» (Москва, 2011 г.), XII Международной конференции «Дислокационная структура и механические свойства металлов и сплавов» (Екатеринбург, 2011 г.), 3-ей Международной научно-технической конференции «Нанотехнологии и наноматериалы» (Москва, 2011 г.), II International Conference on Particle-Based Methods Fundamentals and Applications (Barcelona, 2011 г.), XVII международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (Алушта, 2011 г.), XXXIX International Summer School. Conference APM (2011, St. Petersburg (Repino)), Международной конференции по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов (Томск, 2011 г.), IX Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (Алушта, 2012 г.), IV Международном Казанском инновационном нанотехнологическом форуме «Nanotech'2012», Международной научно-технической конференции «Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки» (Ростов-на-Дону, 2013 г.).

Реализация результатов работы. Результаты работы внедрены на ОАО «АК Корвет» (г. Курган), ООО «СибТехОйл» (г. Тюмень), ООО «Станкотехника» (г. Тула), ООО «Предприятие «Сенсор» (г. Курган), используются в учебном процессе в Курганском государственном университете.

Публикации. Основное содержание диссертации, полученные результаты, выводы и рекомендации опубликованы в 54-х научных работах, в том числе в 17-ти патентах на изобретения и полезные модели, 18-ти статьях в рецензируемых журналах из списка ВАК, материалах 18-ти научных конференций и 1-ом учебном пособии с грифом УМО АМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести разделов, основных выводов и результатов, библиографического списка использованных источников из 431 наименования и 11 приложений, всего 341 страница, включая 166 рисунков и 40 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, определены цель исследования и решаемые задачи, представлены научная новизна и практическая ценность работы, сформулированы выносимые на защиту научные положения.

В первом разделе выполнен аналитический обзор теоретических исследований технологий обработки деталей поверхностной пластической деформации (ППД) и методов формирования в поверхностном слое ультрамелкозернистых и нанокристаллических структур интенсивной пластической деформацией сдвига. Созданию научных основ технологий упрочнения деталей методами ППД посвящены работы Бабицева А.П., Папшева Д.Д., Дальского А.М., Суслова А.Г., Киричка А.В., Безъязычного В.Ф., Хворостухина Л.А., Смелянского В.М., Мазенна П.Г., Korzunsky M., Przybylski W. и других. Существенный вклад в развитие научных знаний о наноструктурировании поверхностных слоев конструкционных материалов и создании наноструктурных покрытий, а также методов моделирования неравновесных структур внесли Панин В.Е., Сегал В.М., Валиев Р.З., Григорьев С.Н., Псахье С.Г., Gleiter H. и другие.

Обозначена проблема наноструктурирования поверхностных слоев конструкционных сталей выглаживанием при серийной обработке прецизионных деталей из конструкционных сталей. На основе анализа методов интенсивной прокатки, равноканального углового прессования (РКУП), ионно-плазменной, фрикционной и SMAT обработок сформулирована **рабочая гипотеза** наноструктурирующего выглаживания, согласно которой формирование в поверхностном слое нанокристаллической структуры и субмиктропофиля при обработке деталей на металлообрабатывающих станках возможно путем управления интенсивностью и накоплением пластических деформаций, развиваемых многократным фрикционно-силовым нагружением инструментом с полусферическим индентором при условии обеспечения динамической устойчивости процесса и допустимой температуры в контактной зоне.

Анализ методов интенсивной пластической деформации показал, что основополагающим принципом создания объемных наноматериалов и формирования наноструктурированных поверхностных слоев является управление:

- интенсивностью деформаций простого сдвига в условиях всестороннего сжатия обрабатываемого материала;
- изменением траектории нагружения и степенью накопления интенсивных пластических деформаций.

Как следует из обзора исследований базового процесса выглаживания, повышение фрикционной составляющей и кратности приложения нагрузки связано с рядом проблем, решение которых необходимо осуществить как в рамках теоретических исследований процесса, так и в рамках его практической реализации. К ним относится управление диссипацией тепловой энергии в контактной зоне поверхностного слоя с целью предотвращения критического состояния сдвиговой неустойчивости и разупрочнения деформируемого материала при повышении скорости обработки.

Важнейшим вопросом теоретического обоснования наноструктурирующего выглаживания является разработка методов установления взаимосвязи

интенсивности фрикционно-силового нагружения поверхностного слоя и параметров пластического деформирования металла с динамической устойчивостью процесса, достижение которой позволит обеспечить производительность и эффективность обработки.

Для технологического обеспечения высокопроизводительного наноструктурирующего выглаживания на металлообрабатывающих центрах требуется научно обосновать вопросы параметрического и конструктивного синтеза системы отвода тепла и демпфирующего узла индентора инструмента.

Основной проблемой исследований является определение взаимосвязи технологических режимов процесса с параметрами качества поверхностного слоя и эксплуатационными свойствами обрабатываемых прецизионных деталей. Анализ состояния вопроса дал возможность сформулировать цель и задачи исследований, приведенные во введении.

Второй раздел посвящен обоснованию методологии решения задач управления наноструктурирующим выглаживанием поверхностных слоев конструкционных сталей и создания инструмента для его реализации. В основу методологии положены:

1. Определение принципов и параметров управления пластическим структурообразованием поверхностного слоя методом наноструктурирующего выглаживания.

2. Систематизация параметров наноструктурирующего выглаживания.

3. Математическая постановка и алгоритм решения задач управления параметрами технологических режимов и синтезом инструмента по критериям пластического структурообразования, динамики и теплофизики процесса.

4. Установление взаимосвязи параметров качества наноструктурированного слоя и трудоемкости процесса с эффективностью пластического структурообразования в границах допустимой скорости обработки.

Пластическое структурообразование в поверхностном слое наноразмерных кристаллитов с большеугловыми границами основано на управлении развитием ротационной пластичности и формированием решетчатой градиентной структуры за счет многократного пересечения плоскостей сдвига в характеристических мезообъемах M при последовательном деформировании по маршруту с изломом траектории на 90° во внеконтактной и контактной зонах очага деформации (рис. 1). В качестве мезообъема рассматривается объемный элемент, которому присущи трансляционные и ротационные моды деформации.

Механизм ротационной пластичности развивается за счет фрикционно-силового нагружения поверхностного слоя в условиях одновременного действия сжатия и сдвига. Принципиальным вопросом управления пластическим структурообразованием поверхностного слоя при наноструктурирующем выглаживании является выделение базового цикла однократного фрикционно-силового нагружения характеристического мезообъема M и кратности его повторения за один и несколько рабочих ходов инструмента (полный цикл обработки).

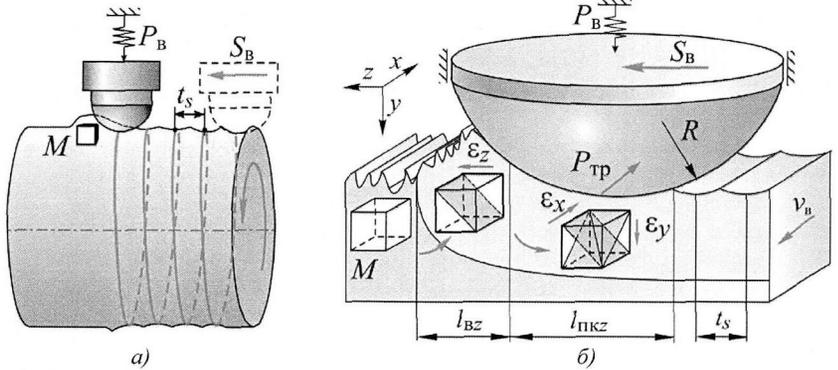


Рис. 1. Кинематика наноструктурирующего выглаживания (а) и схема деформационных смещений характеристического мезообъема с расположением плоскостей сдвига (б)

Отношение высоты валика оттесненного металла h_{BX} к глубине динамического погружения индентора инструмента $h_n = h_{ax} + h_{BH}$ принято в качестве масштабного коэффициента пластического структурообразования:

$$K_b = \frac{h_{BX}}{h_{ax} + h_{BH}}. \quad (1)$$

При заданной силе выглаживания высота валика и сдвиговая компонента деформационного смещения x мезообъема в первую очередь определяются коэффициентом трения процесса f_T (рис. 2а). При интенсивной пластической деформации вдавливания ϵ_y формируется боковая внеконтактная зона очага деформации, отношение которой к шагу подачи $l_{BZ}/t_s \geq 2$ является необходимым условием накопления деформации ϵ_{HZ} и пластического структурообразования.

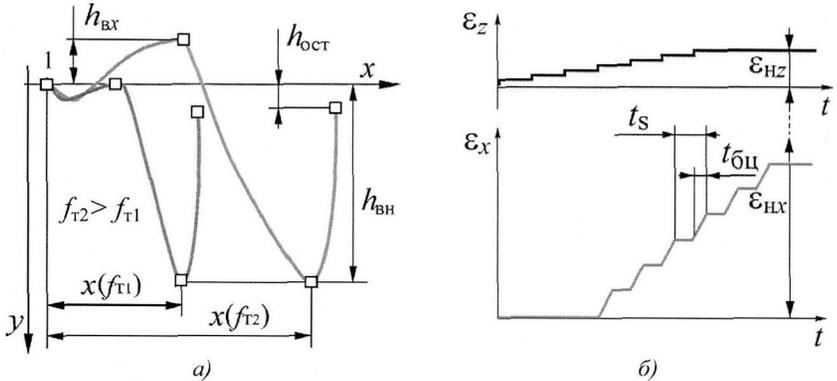


Рис. 2. Базовый цикл деформационных смещений характеристического мезообъема поверхностного слоя (а) и временная схема накопления деформаций в направлении подачи инструмента и скорости обработки (б)

Многokратное повторение фрикционно-силового нагружения и базового цикла деформаций поверхностного слоя за счет управления подачей и количеством рабочих ходов инструмента позволяет создать высокий уровень накопленных деформаций $\varepsilon_{нх}$ и $\varepsilon_{пз}$ (рис. 2б) и обеспечить условия формирования наноструктурного состояния. Кратность нагружения поверхностного слоя определяет эффективность пластического структурообразования. Интегральный параметр кратности нагружений мезообъема поверхностного слоя пластическими сдвигами за цикл рабочего хода инструмента зависит от геометрических параметров очага деформации и шага подачи:

$$n_c = \frac{l_{нх}}{t_s} = \frac{2\sqrt{R^2 - (R - h_{нх})^2}}{t_s} \quad (2)$$

В полном цикле обработки поверхностного слоя за несколько рабочих ходов инструмента интегральный параметр кратности нагружений определяется зависимостью:

$$N_c = \sum_{i=1}^{n_{рх}} n_{ci}, \quad (3)$$

где $n_{рх}$ – количество рабочих ходов инструмента.

Параметры процесса систематизированы по принципам технологического обеспечения качества наноструктурируемого поверхностного слоя и управления пластическим структурообразованием и скоростью обработки (рис. 3).

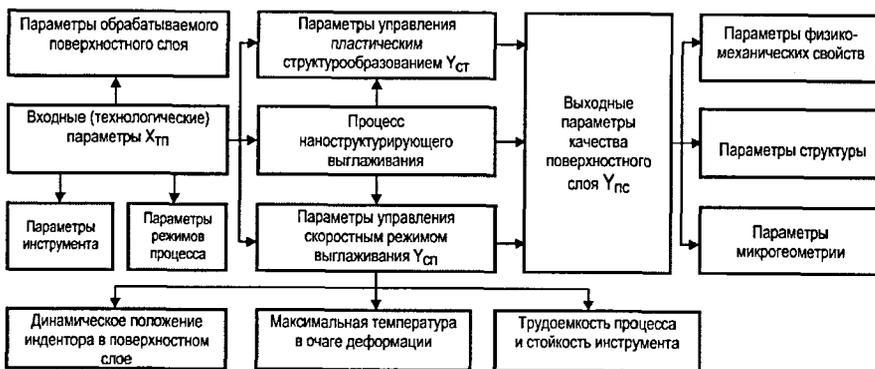


Рис. 3. Система параметров наноструктурирующего выглаживания для решения задач управления технологическими режимами процесса и синтезом инструмента

Входные (технологические) параметры подразделены на группы применительно к обрабатываемому поверхностному слою (физико-механические, теплофизические и шероховатости), инструменту (конструктивные и описывающие динамические и теплофизические свойства индентора) и режимам обработки (сила P_n и скорость v_n выглаживания, подача S_n и количество рабочих ходов инструмента $n_{рх}$).

Выходные параметры качества наноструктурированного слоя согласно современным научным представлениям и нанометрологическим стандартам

подразделены на параметры физико-механических свойств (твердость вдавливания H_{IT} , контактный модуль упругости E^* , удельная контактная твердость H_{IT}/E^* , сопротивление поверхностного слоя пластической деформации H_{IT}^3/E^{*2} , микротвердость HV , остаточные напряжения $\sigma_{ост}$), структурного состояния (ширина рентгеновской линии $B_{(110)кв}$, размер кристаллитов $\delta_{нк}$) и микрогеометрии (среднее арифметическое отклонение профиля Ra_b , глубина наноструктурированного слоя $h_{нс}$).

Система параметров управления пластическим структурообразованием включает интегральные параметры фрикционно-силового нагружения поверхностного слоя (коэффициент трения f_t и кратность нагружения N_c) и параметры его деформированного состояния (масштабный коэффициент K_b и степени накопленных деформаций $\varepsilon_{нв}$, $\varepsilon_{нз}$ в направлениях скорости обработки и подачи инструмента).

Теоретическое обоснование скоростного режима выглаживания решается на основе моделирования динамики и теплофизики процесса. Динамическое положение индентора в поверхностном слое $y_1(t)$ зависит от стабилизирующего действия силы реакции в контакте индентора с валиком пластически отесняемого металла и диссипативных свойств демпфирующей системы инструмента. Скорость выглаживания и параметры демпфера инструмента определяются по критерию динамической устойчивости процесса $|y_1(t) - y_{1,уст}| \leq \Delta y_1$. Допустимое отклонение динамического положения индентора Δy_1 определяется требованиями к точности размера детали и волнистости формируемой поверхности.

Одним из основных методологических вопросов управления наноструктурирующим выглаживанием является разработка теплофизической модели процесса, учитывающей специфику теплопередачи в обрабатываемом материале и инструменте и позволяющей установить взаимосвязь скорости обработки v_b с максимальной температурой θ_{max} в очаге деформации и создать теплоотводящую систему из контактной зоны очага деформации.

Математическая постановка и алгоритм решения задач теоретического обоснования и реализации процесса включают:

1. Определение функциональных связей параметров управления пластическим структурообразованием и скоростью обработки с технологическими параметрами процесса $Y_j = f(\bar{X}_{тн})$.

2. Определение допустимых границ изменения параметров управления по критериям пластического структурообразования, динамики, теплофизики и трудоемкости процесса $y_{jn} < Y_j(\bar{X}_{тн}) < y_{jn}$.

3. Выбор допустимых границ изменения параметров инструмента и технологических режимов обработки $x_{и} < x_i < x_{и}$.

4. Установление взаимосвязи параметров качества наноструктурированного слоя с интегральным параметром эффективности пластического структурообразования $Y_{нс} = f(N_c)$ в границах допустимой трудоемкости обработки.

Третий раздел посвящен разработке методов установления взаимосвязи параметров управления пластическим структурообразованием поверхностного слоя и технологических параметров на основе конечно-элементного и физического моделирования процесса. Для управления фрикционно-силовым нагружением поверхностного слоя и интенсивностью пластической деформации сдвига обоснован выбор материала рабочих элементов индентора инструмента.

Анализ инструментальных материалов высокой твердости для наноструктурирующего выглаживания типовых конструкционных сталей проводился по критериям теплопроводности, коэффициенту трения и адгезионному схватыванию. Установлено, что для наноструктурирующего выглаживания закаленных и низкоотпущенных сталей типа 20X наиболее подходят ультрамелкодисперсные поликристаллические сверхтвердые материалы (ПСТМ), нержавеющей сталей типа 20X13 и 08X18H10T – синтетические алмазы.

Фактические величины коэффициента трения определены при физическом моделировании процесса на трибологической установке знакопеременного движения. Сила выглаживания моделировалась от 200 до 1000 Н, скорость индентора с радиусом рабочей части $R=2$ мм задавалась равной $0,035...0,05$ м/с. Определено, что максимальный коэффициент деформационного трения ($f_t=0,34...0,36$) по стали 20X ($HRC \geq 55$) обеспечивает нанокompозит плотного нитрида бора DBN (Dense Boron Nitride) в среде воздуха и инертного газа (аргона). В условиях жидкой смазочно-охлаждающей технологической среды (СОТС) коэффициент $f_t=0,13...0,15$. При обработке поверхностных слоев сталей 20X13 и 08X18H10T инструментальным материалом ВК8 или DBN в газообразных и жидких средах наблюдалась высокая интенсивность адгезионного схватывания и массоперенос. Установлено, что коэффициент трения синтетического алмаза АСПМ-3 по стали 20X13 (HB 270...460) и 06X18H10T (HB150) составляет, соответственно, в воздушной среде 0,14 и 0,11; в среде СОТС типа Rhenus – 0,11 и 0,09. При использовании рабочих элементов инденторов из природного алмаза коэффициент трения не превышает значения 0,08.

Для установления функциональной взаимосвязи параметров управления пластическим структурообразованием и технологических параметров наноструктурирующего выглаживания разработана динамическая конечно-элементная модель процесса применительно к базовому циклу фрикционно-силового нагружения и накопления деформаций. При моделировании использовалась упругопластическая модель материала с изотропным упрочнением и критерием текучести Мизеса. Согласно вариационному принципу виртуальных перемещений, принято, что изменение внутренней энергии деформаций компенсируется таким же изменением внешней работы приложенных нагрузок:

$$\int_V \sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij} dV = \int_S f_i^S \delta u_i dS + \int_V f_i^B \delta u_i dV, \quad (4)$$

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений Коши; ε_{ij} – компоненты тензора деформаций; u_i – компоненты вектора перемещений; f_i^S, f_i^B – компоненты векторов поверхностных и массовых (в том числе инерционных) сил; V, S – объем и площадь поверхности рассматриваемого участка деформируемого тела.

В пространстве технологических параметров процесса и во времени оп-

ределялись компоненты тензора напряжений σ_{ij} , давление P_s , эквивалентные напряжения σ_{eq} и интенсивности накопленных пластических деформаций $\epsilon_{eq}^{pl} = \int \sqrt{2/3} \dot{\epsilon}_{ij}^{pl} \dot{\epsilon}_{ij}^{pl} dt$, где $\dot{\epsilon}_{ij}^{pl}$ – компоненты тензора скоростей пластических деформаций. Кроме того, на основе динамического моделирования компонент вектора перемещений u_i создана возможность анализа изменения геометрических параметров очага деформации: высоты валика пластически отесненного металла h_b и глубины внедрения индентора $h_{вн}$. Предел текучести обрабатываемого материала $\sigma_s(\epsilon)$ задавался в соответствии с трехпараметрическими кривыми деформационного упрочнения, установленными методом кинетического микроиндентирования поверхностного слоя исследуемых сталей 20X(HRC55), 20X13(HB460) и AISI 304(HB150) после чистового точения плоских образцов.

Динамическое конечно-элементное моделирование процесса осуществлялось в пакете ANSYS/LS-DYNA. Нагружение поверхностного слоя образца моделировалось с граничными условиями симметрии. Количество узлов сетки модели достигало 53352, количество элементов – 51601.

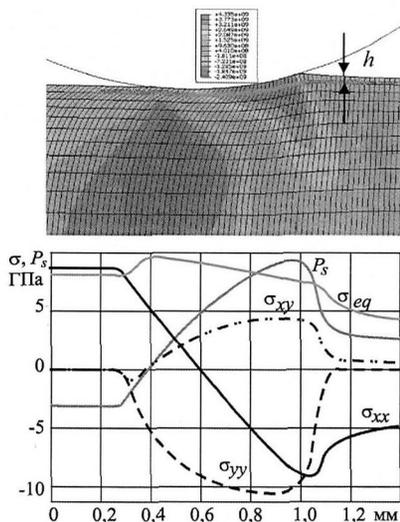


Рис. 4. Распределение компонент тензора напряжений и гидростатического давления P_s в очаге деформации при наноструктурирующем выглаживании стали 20X(HRC55): скорость выглаживания $v_b=10$ м/мин; радиус индентора $R=2$ мм; коэффициент трения $f_t=0,35$

При моделировании нагрузки ($P_b=122,5 \dots 500$ Н, $f_t=0,01 \dots 0,35$) установлено, что максимальные напряжения сдвига σ_{xy} возникают в передней полуконтактной зоне и являются равномерно распределенными. В очаге деформации реализуется сложное знакопеременное напряженное состояние, необходимое для развития механизма ротационной пластичности и фрагментирования исходной структуры. Совместный анализ компонент напряжений при повышении нагрузки до $P_b=350$ Н и $f_t=0,35$ свидетельствует, что в приповерхностных слоях на глубине $h \approx 20$ мкм напряженное состояние перед индентором подобно одноосному сжатию (рис. 4). Коэффициент Лодэ-Надаи μ в этой зоне равен $\sim 0,5$. Напряженное состояние за индентором близко к одноосному растяжению ($\mu \approx 0,7$) и может вызвать разрушение.

Пример результатов динамического конечно-элементного моделирования зависимости коэффициента пластического структурообразования K_b от силы выглаживания P_b представлен на рисунке 5а.

Моделирование позволяет также расчетно определять параметр кратности нагружения поверхностного слоя n_c при варьировании силы выглаживания P_b и шага подачи t_s (рис. 5б).

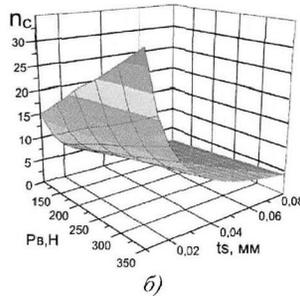
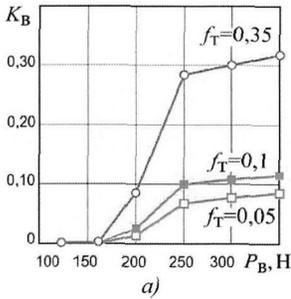


Рис. 5. Зависимости масштабного коэффициента пластического структурообразования K_B (а) и кратности нагружения n_c поверхностного слоя (б) от технологических параметров и коэффициента трения процесса

В основу физического моделирования наноструктурирующего выглаживания положена обработка плоского образца (патент РФ №120226) во фрезерном режиме с погрешностью позиционирования индентора не более 1 мкм. Однократное и многократное фрикционно-силовое нагружение поверхностного слоя осуществлялось при варьировании технологических параметров процесса (P_B , v_B , S_B , n_{px}) в соответствии с результатами конечно-элементного моделирования. Физическое моделирование однократного фрикционно-силового нагружения выполнялось при подаче инструмента $S_B=0$ (рис. 6а). При моделировании многократного нагружения (рис. 6 б, в) задавались радиальное смещение инструмента, равное шагу подачи l_s , и количество рабочих ходов инструмента n_{px} .

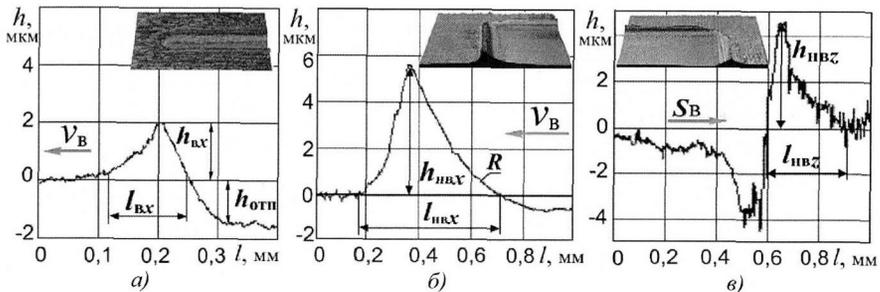
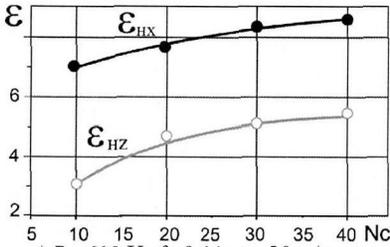


Рис. 6. Физическое моделирование однократного (а) и многократного (б, в) фрикционно-силового нагружения поверхностного слоя

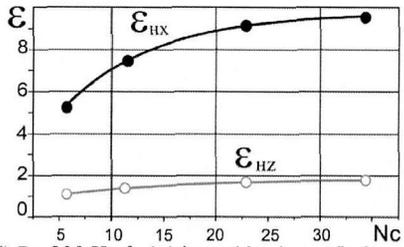
На основе профилометрии участков после наноструктурирующей обработки и определения геометрических параметров валиков оттесненного металла может быть установлено влияние коэффициента трения f_T и кратности нагружения N_c на степени накопления интенсивной пластической деформации сдвига в направлениях скорости выглаживания (ϵ_{HX}) и подачи инструмента (ϵ_{HZ}), определяемые зависимостями:

$$\epsilon_{HX} = (l_{HX} - l_{BX})/l_{BX}; \quad \epsilon_{HZ} = (l_{HBZ} - l_{BZ})/l_{BZ}, \quad (5)$$

где l_{HX} , l_{HBZ} – ширина накопленных валиков в направлении скорости выглаживания и подачи, l_{BX} , l_{BZ} – ширина фронтального и бокового валиков, формирующихся в базовом цикле деформирования поверхностного слоя. Результаты оценки степени накопленных деформаций представлены на рисунке 7.



а) $P_B=610$ Н; $f_T=0,11$; $v_B=30$ м/мин;
 $R=4$ мм; $S_B=0,04$ мм/об



б) $P_B=200$ Н; $f_T=0,34$; $v_B=10$ м/мин; $R=2$ мм;
 $S_B=0,04$ мм/об

Рис. 7. Степени накопленных деформаций ε_{HX} и ε_{HZ} при наноструктурирующем выглаживании сталей 20X13 (HB460) (а) и 20X(HRC55) (б)

Установлено, что предельный уровень степени накопленных деформаций $\varepsilon_{HX}=9,2$ после наноструктурирующего выглаживания стали 20X13 достигается при $N_c \geq 40$. Коэффициент немонотонности деформации $K_{нд} = \varepsilon_{HX} / \varepsilon_{HZ} = 1,3 \dots 1,7$. После обработки стали 20X(HRC55) предельная величина степени пластических деформаций $\varepsilon_{HX} \approx 9,5 \dots 10$ формируется при $N_c \geq 23$, коэффициент $K_{нд} = 4 \dots 4,5$.

В четвертом разделе разработаны теоретические основы моделирования нелинейной динамики наноструктурирующего выглаживания и параметрического синтеза демпфирующего узла инструмента. Введено понятие динамической характеристики наноструктурирующего выглаживания (ДХНВ), устанавливающей связь силы реакции в контакте P_k с координатой y_1 вершины полусферического индентора в поверхностном слое относительно средней линии профиля. Установлено, что при динамическом вдавливании и всплывтии индентора гистерезисный характер изменения силы реакции в контакте P_k является источником притока энергии в колебательный процесс и обуславливает развитие автоколебаний при достижении критической скорости выглаживания $v_{вкр}$ (рис. 8).

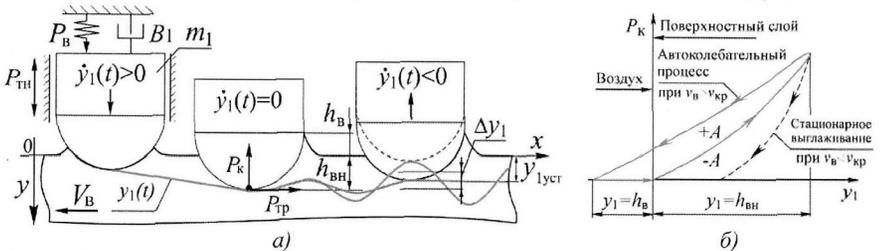


Рис. 8. Схема динамического положения индентора при вдавливании и всплывтии (а) и зависимость силы реакции в контакте P_k от координаты вершины индентора y_1 (б): A – работа силы P_k за цикл колебаний индентора

Математическая модель динамики наноструктурирующего выглаживания представляет собой нелинейный диссипативный осциллятор в виде дифференциального уравнения второго порядка с разрывной правой частью. Применительно к вдавливанию и всплывтию индентора в поверхностном слое и в условиях стационарности процесса:

$$m_1 \ddot{y}_1(t) + B_1 \dot{y}_1(t) + \begin{cases} P_k = P_b - P_{тн} & \text{при } \dot{y}_1(t) > 0 \\ P_k = P_b + P_{тн} & \text{при } \dot{y}_1(t) < 0 \end{cases} \quad (6)$$

При разрыве контакта в случае развития автоколебаний:

$$m_1 \ddot{y}_1(t) + B_1 \dot{y}_1(t) = \begin{cases} P_b + P_{тн} & \text{при } \dot{y}_1(t) < 0 \\ P_b - P_{тн} & \text{при } \dot{y}_1(t) > 0 \end{cases} \quad (7)$$

Сила трения в направляющих индентора $P_{тн}$ и демпфер инструмента с эквивалентным коэффициентом вязкого демпфирования B_1 определяют диссипацию энергии и препятствуют развитию колебаний. Для определения силы реакции в контакте P_k предложена математическая модель, учитывающая динамическое изменение контактной площади и контактного давления $p_{ск}$ во взаимосвязи с масштабным коэффициентом пластического структурообразования K_b :

$$P_k(y_1) = \pi R h_d(y_1, K_b) p_{ск}(y_1, H), \quad (8)$$

где H – твердость обрабатываемого поверхностного слоя.

Глубина динамического внедрения индентора h_d при вдавливании и всплывии с учетом направления скорости осевого смещения:

$$h_d(y_1(t)) = \begin{cases} y_1(t) + y_1(t) \frac{K_b}{1 - K_b} & \text{при } \dot{y}_1(t) > 0, \end{cases} \quad (9)$$

$$h_d(y_1(t)) = \begin{cases} y_1(t) + y_{\text{max}} \frac{K_b}{1 - K_b} & \text{при } \dot{y}_1(t) < 0. \end{cases} \quad (10)$$

Учитывая существенную нелинейность математической модели динамики наноструктурирующего выглаживания, для анализа устойчивости процесса в пространстве технологических параметров и начальных условий применен метод фазового портрета. Пример фазовых траекторий положений вершины полусферического индентора при автоколебательном и динамически устойчивом наноструктурирующем выглаживании поверхностного слоя стали 20X(HRC55) с параметрами инструмента $R=2$ мм, $m_1=0,033$ кг, $P_{тн}=2$ Н, $B_1=20$ Нс/м и режимов обработки $P_b=200$ Н, $v_b=10$ м/мин для различных значений масштабного коэффициента пластического структурообразования K_b приведен на рисунке 9.

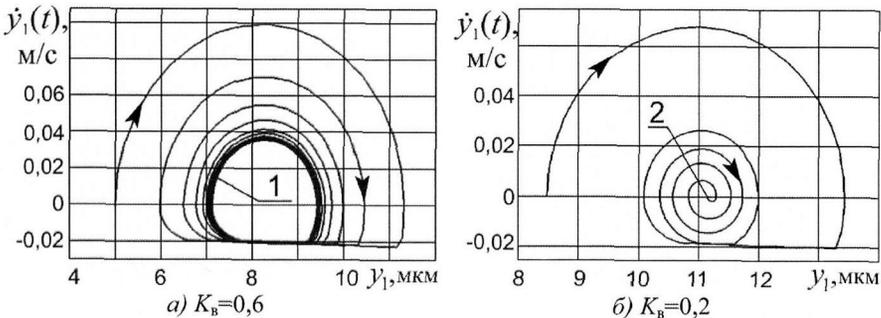


Рис. 9. Фазовые траектории автоколебательного (а) и стационарного (б) режимов процесса: 1 – устойчивый предельный цикл автоколебаний; 2 – устойчивый фокус

Разработанный метод исследования динамики процесса позволяет определять критическую скорость выглаживания $v_{\text{вкр}}$, при достижении которой возможен отрыв индентора от обрабатываемой поверхности и возбуждение автоколебаний:

$$v_{\text{вкр}} = \dot{y}(t) \sqrt{2RK_B / h_s} . \quad (11)$$

Для установления взаимосвязи критической скорости обработки с масштабным коэффициентом пластического структурообразования K_B и силой выглаживания P_B строятся номограммы (рис. 10а).

Моделирование динамики наноструктурирующего выглаживания в пространстве параметров инструмента и коэффициента K_B позволило определить значения массы индентора m_1 и эквивалентного коэффициента B_1 демпфирующего узла для обеспечения стационарного режима процесса (рис. 10б).

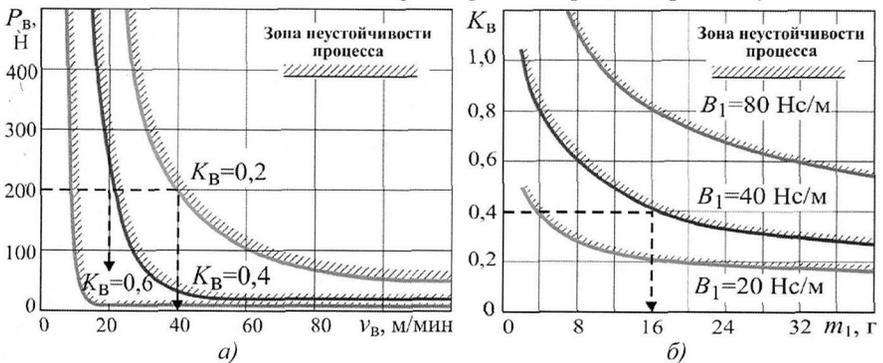


Рис. 10. Номограммы для определения параметров режимов и инструмента по критериям пластического структурообразования и динамической устойчивости процесса

Согласно теоретически установленным границам динамической устойчивости процесса, выполнен конструктивный синтез упругодемпфирующего узла инструмента с эластомерными демпфирующими элементами вязкого трения, которые классифицированы в следующие группы: коаксиальные, сжатия и комбинированные. Для определения коэффициента вязкого демпфирования B_1 индентора инструмента реализован метод динамических нагрузочных характеристик и эквивалентной линеаризации, создана экспериментальная установка.

Установлено, что эластомерные демпферы коаксиального типа обеспечивают требуемый уровень эквивалентного коэффициента вязкого демпфирования при минимальных размерах инструмента. Доказано, что в стандартных габаритах инструмента для обрабатываемых центров и при условии обеспечения массы индентора 8...17 г может быть достигнуто значение эквивалентного коэффициента вязкого демпфирования B_1 от 40 до 150 Нс/м.

В пятом разделе рассмотрены вопросы повышения скорости и производительности наноструктурирующего выглаживания на основе теоретического обоснования теплоотводящей системы инструмента. В теоретических исследованиях использовались работы А.П. Амосова, А.В. Чичинадзе, Ю.П. Шлыкова, Г.А. Сипайлова, R. Holm. Математическая модель теплофизики наноструктури-

рующего выглаживания, позволяющая установить взаимосвязь скорости обработки с максимальной температурой в очаге деформации θ_{\max} и определить параметры системы теплоотвода, создана на основе метода тепловых сетей, реализующего конечно-разностный подход.

Физическая модель и эквивалентная тепловая схема наноструктурирующего выглаживания с возможными вариантами отвода тепла представлены на рисунке 11. Тепловая схема включает источник тепловыделения процесса мощностью $q_{\text{нсв}} = P_{\text{в}} f_{\text{в}} v_{\text{в}}$ и термические сопротивления поверхностного слоя и элементов системы теплоотвода. Источник тепловыделения принято считать расположенным на глубине залегания максимальных напряжений сдвига $h_{\text{сху}}$.

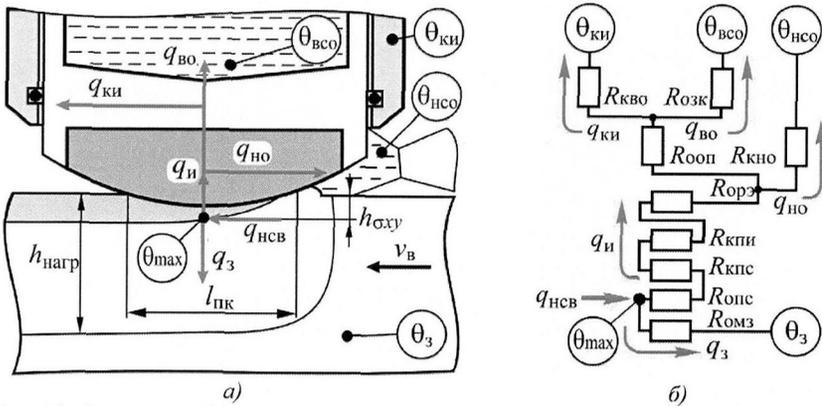


Рис. 11. Физическая (а) и эквивалентная (б) тепловые схемы наноструктурирующего выглаживания с теплоотводящей системой: $q_{\text{з}}$, $q_{\text{и}}$ – тепловые потоки в заготовку и индентор инструмента; $\theta_{\text{нсо}}$, $\theta_{\text{всо}}$, $\theta_{\text{з}}$, $\theta_{\text{ки}}$ – температуры наружной и внутренней охлаждающей среды индентора, заготовки и корпуса инструмента

Система теплоотвода предусматривает сток тепла через индентор в корпус инструмента $q_{\text{ки}}$ и в наружную $q_{\text{но}}$ или внутреннюю $q_{\text{во}}$ среду охлаждения. Термические сопротивления подразделены на объемные и контактные. Объемные сопротивления обусловлены теплопроводностью материалов, контактные – условиями теплопередачи.

По признакам комбинации теплостоков и характеру их влияния на коэффициент трения разработана классификация систем теплоотвода (табл. 2) созданы конструктивные исполнения инструмента с учетом результатов синтеза демпфирующего узла индентора (рис. 12). Установлены математические зависимости термических сопротивлений в рассматриваемых системах отвода тепла (табл. 3).

Впервые показано, что тепловой поток $q_{\text{и}}$ в контактной зоне вследствие резкого сужения приводит к возникновению добавочных контактных сопротивлений стягивания в приповерхностном слое и инденторе.

Таблица 2. Классификация вариантов реализации систем теплоотвода

Направление теплоотвода	Тип системы теплоотвода	Параметры управления	
		q	f_r
В корпус инструмента	А	$q_{кн} \neq 0; q_{но} = 0; q_{во} = 0$	$f_r \rightarrow f_{r\max}$
В корпус инструмента и наружную среду охлаждения в ламинарном режиме	Б	$q_{кн} \neq 0; q_{но} \neq 0; q_{во} = 0$	$f_{r\min} < f_r < f_{r\max}$
Во внутреннюю среду охлаждения индентора в турбулентном режиме	В	$q_{кн} = 0; q_{но} = 0; q_{во} \neq 0$	$f_r \rightarrow f_{r\max}$

Таблица 3. Математические модели термических сопротивлений эквивалентной тепловой схемы наноструктурирующего выглаживания

Наименование термического сопротивления	Математическая модель*
Объемное нагреваемого материала заготовки	$R_{0МЗ} = \frac{4\sqrt{3}\lambda_{МЗ}l_{ПК}/2c_{МЗ}\rho_{МЗ}v_B}{\pi\lambda_{МЗ}l_{ПК}^2}$
Объемное материала приповерхностного слоя	$R_{0пс} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{h_{спв}}{\lambda_{пс}l_{ПК}^2}$
Объемное материала рабочего элемента индентора	$R_{0рз} = \frac{h_{рз}}{\lambda_{рз}A_{рз}}$
Объемное оправки индентора	$R_{0оп} = \frac{h_{оп}}{\lambda_{оп}A_{топ}}$
Объемное зазора Δ , между оправкой индентора и корпусом инструмента	$R_{0зк} = \frac{\ln \frac{r_к}{r_и}}{2\pi\lambda_{МЗ}l_з}$
Контактное приповерхностного слоя (сопротивление стягивания)	$R_{кпс} = \frac{1}{\pi l_{ПК}\lambda_{пс}}$
Контактное рабочего элемента индентора (сопротивление стягивания)	$R_{кпн} = \frac{1}{\pi l_{ПК}\lambda_{рз}}$
Контактное конвективное индентора при наружной среде охлаждения	$R_{кно} = \frac{1}{\alpha_{но}A_{тно}}$
Контактное конвективное индентора при встроенной среде охлаждения	$R_{кво} = \frac{1}{\alpha_{во}A_{тво}}$

* $\lambda_{МЗ}, \lambda_{пс}, \lambda_{рз}, \lambda_{оп}, \lambda_{МЗ1}$ – теплопроводности материалов заготовки, поверхностного слоя, рабочего элемента индентора, оправки индентора, среды в зазоре; $\alpha_{но}, A_{тно}$ – коэффициент теплоотдачи и площадь теплоотвода при наружном охлаждении индентора; $\alpha_{во}, A_{тво}$ – коэффициент теплоотдачи и площадь теплоотвода при внутреннем охлаждении индентора; $h_{рз}, h_{оп}$ – высота рабочего элемента и оправки индентора; $l_з$ – длина зазора; $r_и, r_к$ – радиус оправки индентора и отверстия в корпусе инструмента

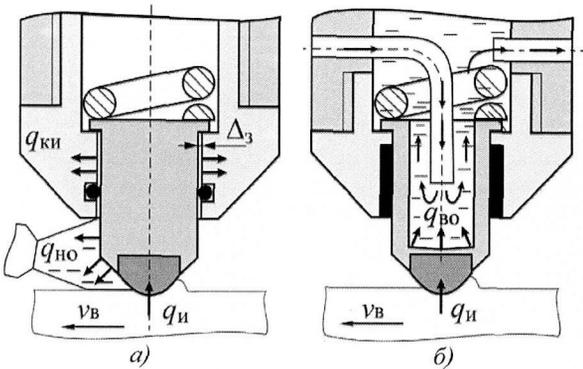


Рис. 12. Конструктивные схемы инструмента с демпфером сухого трения и системами тепловода типа А и Б (а) и с коаксиальным демпфером и встроенным теплопроводом от полого индентора типа В (б)

На основе метода замещения эквивалентной тепловой схемы теплофизическая модель наноструктурирующего выглаживания с вариантами систем тепловода представлена в матричной форме записи узловых тепловых потоков, проводимостей и температур:

$$q^n = \Theta^n G^n. \quad (12)$$

Схема замещения эквивалентной тепловой схемы наноструктурирующего выглаживания с возможными вариантами теплопроводящей системы приведена на рисунке 13.

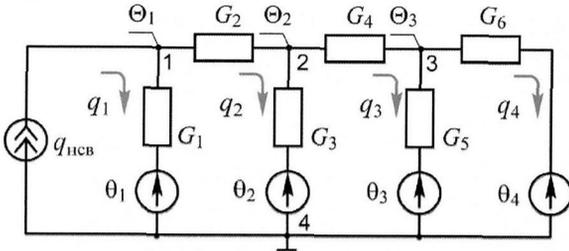


Рис. 13. Схема замещения обобщенной эквивалентной тепловой схемы наноструктурирующего выглаживания с теплопроводящей системой

Для определения эффективности вариантов теплопроводящей системы определены граничные условия повышения скорости обработки по критическому состоянию сдвиговой неустойчивости материала поверхностного слоя, проявляющейся в существенном ухудшении шероховатости поверхности, развитии автоколебаний индентора и адгезионном схватывании.

Температурный порог критического состояния сдвиговой неустойчивости обрабатываемых сталей экспериментально определен в адиабатических условиях процесса на основе патентозащищенного инструмента со встроенной термопарой (патент РФ №126979). Установлена взаимосвязь измеренной температуры в контактной зоне очага деформации со скоростью обработки и шероховатостью. Определено, что для стали 20X(HRC55) температурный порог критического состояния сдвиговой неустойчивости материала составляет $\sim 295^\circ\text{C}$, для стали 20X13(HB460) $\sim 370^\circ\text{C}$.

Численное моделирование взаимосвязи максимальной температуры в очаге деформации со скоростью наноструктурирующего выглаживания воз-

можно при установленном значении теплопроводности поверхностного слоя. Для измерения теплопроводности материала поверхностного слоя после наноструктурирующего выглаживания создана и запатентована специальная установка, реализующая метод теплового импульса. Определено, что после чистового точения и четырех рабочих ходов инструмента теплопроводность поверхностного слоя стали 20X(HRC55) с исходной величины $\lambda_{nc} \approx 42$ Вт/м·К уменьшается до значения 30,75 Вт/м·К (на 27%) и при аналогичной обработке стали 20X13(HB460) – с исходной величины 22 Вт/м·К до значения 16,83 Вт/м·К (на 23,5%). Характер изменения λ_{nc} экспоненциальный.

Результаты численного моделирования температуры в очаге деформации наноструктурированного поверхностного слоя сталей 20X и 20X13 после четвертого рабочего хода инструмента ($n_{px}=4$) представлены на рисунке 14.

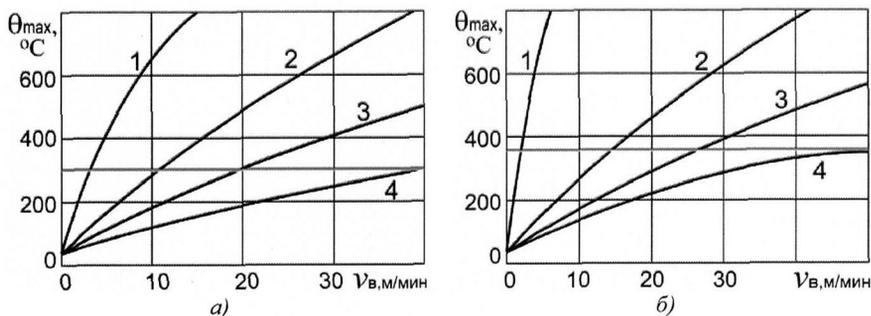


Рис. 14. Зависимость максимальной температуры в очаге деформации от скорости обработки сталей инструментом с радиусом рабочей части индентора $R=2$ мм при подаче $S_B=0,04$ мм/об: *а* – стали 20X(HRC55) с силой $P_B=200$ Н материалом DBN; *б* – стали 20X13(HB460) с силой $P_B=350$ Н синтетическим алмазом АСПМ-3

Моделирование осуществлялось для адиабатических условий процесса (кривые 1) и систем тепловода типа А в корпус инструмента (кривые 2), типа Б с наружным охлаждением (кривые 4) и типа В с применением внутреннего охлаждения индентора потоком СОТС на водной основе (кривые 3). Наружное охлаждение индентора СОТС снижает коэффициент трения при обработке поверхностного слоя стали 20X(HRC55) индентором с рабочим элементом из ПСТМ типа DBN с 0,34 до 0,13, а при наноструктурирующем выглаживании стали 20X13(HB460) синтетическим алмазом АСПМ-3 – с 0,14 до 0,11. Турбулентный режим охлаждения обеспечивается за счет извилистого теплоотводящего канала при расходе жидкости от 0,1 до 0,9 л/мин.

Таким образом, при использовании инструмента с системой тепловода типа Б скорость наноструктурирующего выглаживания стали 20X13(HB460) по условию порога температуры в очаге деформации 370°C достигает величины ~ 50 м/мин. Наноструктурирующее выглаживание стали 20X(HRC55) материалом DBN возможно в условиях применения теплоотводящей системы типа Б на скорости 38...40 м/мин и при реализации системы типа В – 20 м/мин.

В шестом разделе анализируются результаты исследований структурных, физико-механических и эксплуатационных свойств поверхностных слоев сталей 20X, 20X13 и AISI304 (08X18H10T) после наноструктурирующего выглаживания, реализованного на теоретически обоснованных режимах.

Электронно-микроскопическим исследованием методом тонких фольг на просвет установлено, что структурное состояние материала поверхностного слоя закаленной и низкоотпущенной стали 20X(HRC55) после твердого чистового точения (рис. 15а) с режимом ($v=80$ м/мин; $S=0,06$ мм/об) и наноструктурирующего выглаживания ($f_r=0,34$; $v_b=10$ м/мин; $P_b=200$ Н; $S_b=0,04$ мм/об; $N_c=23$) формируется мелкодисперсная структура поверхностного слоя. Кольцевой вид микроэлектроннограммы (рис. 15б) с заметным азимутальным размытием рефлексов свидетельствует о сильной фрагментации кристаллов α -фазы и значительных разориентировках отдельных фрагментов. Размер кристаллитов $\sim 20\text{...}50$ нм. Определена толщина наноструктурированного слоя, составляющая $\sim 8\text{...}12$ мкм (рис. 15в).

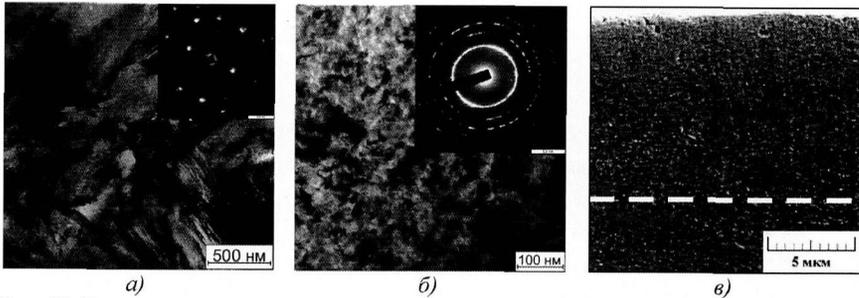


Рис. 15. Электронная просвечивающая (а, б) и сканирующая (в) микроскопия поверхностного слоя цементованной стали 20X(HRC55)

Наноструктурирующее выглаживание обеспечивает значительное изменение параметров физико-механических и структурных свойств поверхностного слоя. На основе кинетического микроиндентирования и рентгеноструктурного анализа установлено повышение твердости вдавливания H_{IT} до 13 ГПа (рис. 16а), ширины рентгеновской линии $B_{(110)\alpha}$ до 94 мин (рис. 16б), удельной контактной твердости H_{IT}/E^* до 0,06 (рис. 17а).

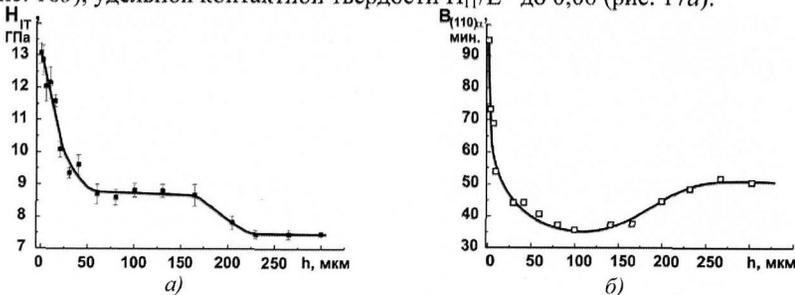


Рис. 16. Изменение нанотвердости H_{IT} (а) и ширины рентгеновской линии $B_{(110)\alpha}$ (б) по глубине поверхностного слоя h стали 20X

Зависимости физико-механических свойств наноструктурированного слоя от кратности нагружения (рис. 17) имеют горизонтальные асимптоты и аппроксимируются функциями вида $Y = a - bd^{N_c}$. Значения параметров a и b определяются размерами и скоростью формирования нанокристаллитов.

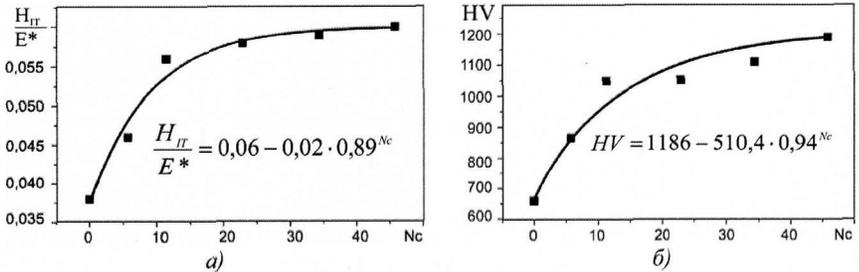


Рис. 17. Зависимость удельной контактной твердости H_T/E^* (а) и микротвердости $HV_{0,025}$ (б) поверхностного слоя стали 20X(HRC55) от кратности фрикционно-силового нагружения N_c

При наноструктурирующем выглаживании индентором с синтетическим алмазом АСПМ-3 закаленной низкоотпущенной стали 20X13(НВ460) со структурой реечного мартенсита после чистового точения (рис. 18а) при силе выглаживания $P_B=230$ Н ($S_B=0,04$ мм/об, $v_B=30$ м/мин) интенсивно развивается ротационный механизм пластичности, однако наноструктурное состояние не достигается (рис. 18б).

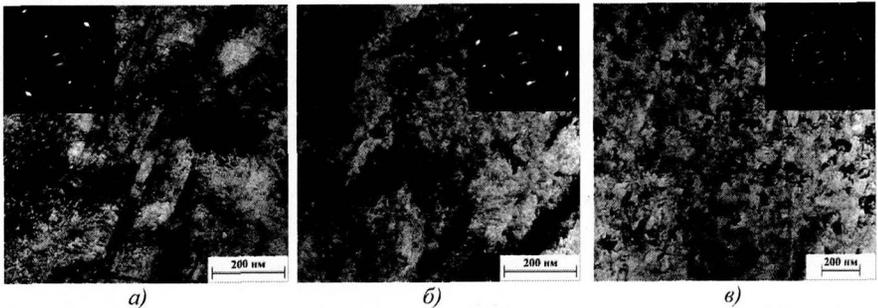


Рис. 18. Структура низкоотпущенной стали 20X13 в исходном состоянии (а) и после наноструктурирующего выглаживания при различных режимах обработки (б, в)

С увеличением интенсивности нагрузки до $P_B=340$ Н в поверхностном слое толщиной 3...5 мкм возникают ультрадисперсная и нанокристаллическая структуры с размером большинства кристаллитов менее 100 нм, на что указывает кольцевой вид микродифракции (рис. 18в).

Предельные значения параметров качества поверхностного слоя низкоотпущенной стали 20X13 также определяются кратностью фрикционно-силового нагружения и при $N_c \sim 20$ достигают максимальных значений (табл. 4).

Структура поверхностного слоя закаленной до HB150 аустенитной стали AISI 304 (08X18H10T) после многопроходного наноструктурирующего выглаживания алмазным индентором приведена на рисунке 19. Согласно данным рентгенофазового анализа, наноструктурирующее выглаживание приводит почти к полному деформационному распаду аустенита: содержание γ -фазы не превышает 4% в слое толщиной до 100 мкм. Сформированный поверхностный слой обладает высокой температурной стабильностью, при нагреве до 400 °C его фазовый состав практически не изменяется.

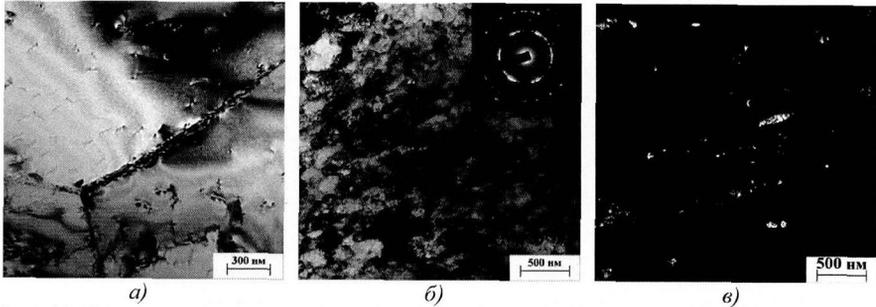


Рис. 19. Структура поверхностного слоя стали AISI 304 в исходном состоянии (а) и после многопроходного наноструктурирующего выглаживания (б, в)

Параметры качества сформированных поверхностных слоев сталей 20X, 20X13 и AISI304 приведены в таблице 4.

Таблица 4. Параметры качества поверхностного слоя после наноструктурирующего выглаживания

Параметр наноструктурированного поверхностного слоя	20X (HRC55)	20X13 (HB460)	AISI304 (HB150)
Ширина рентгеновской линии $V(110)\alpha$, мин	94	48,7	36
Твердость вдавливания H_{IT} , ГПа	13	9,2	5,4
Микротвердость $NV_{0,025}$	1200	815	450
Удельная контактная твердость H_{IT}/E^*	0,061	0,041	0,025
Остаточные напряжения, МПа	-1200	-1584	-667
Среднее арифметическое отклонение профиля Ra , мкм	0,09	0,05	0,05
Толщина наноструктурированного слоя, мкм	8...12	3...5	4...6

Таким образом, наноструктурированный слой после финишной обработки конструкционных сталей формируется в виде естественной пленки с сохранением химического состава исходного материала и имеет физико-механические свойства, близкие к уровню твердых нанокompозитных покрытий.

Выполнен комплекс исследований эксплуатационных свойств закаленных и низкоотпущенных тестовых образцов и деталей после обработки наноструктурирующим выглаживанием на установленных режимах. Выявлено, что снижение интенсивности изнашивания цементованной стали 20X(HRC55) по за-

крепленному абразиву кремню и корунду составляет по сравнению с технологией электрополирования соответственно 2 и 1,5 раза (рис. 20а).

Наноструктурирующее выглаживание стали 20X13(HB460) по сравнению с технологией электрополирования приводит к увеличению износостойкости поверхностного слоя при трении по кремню в 1,6 раза. При испытаниях на трение скольжения по пластине из стали 12X18H10T со смазкой – в 2,4 раза (рис. 20б). Установлено, что повышение износостойкости связано с переходом от адгезионного схватывания к нормальному механохимическому износу.

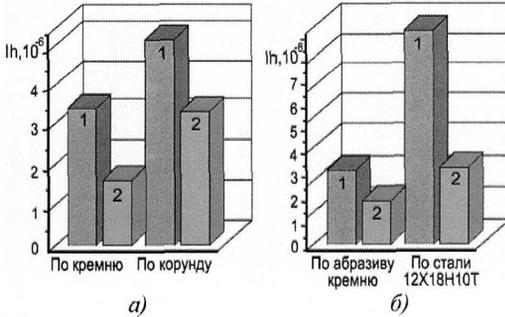


Рис. 20. Интенсивность изнашивания Ih цементованной стали 20X(HRC55) при испытаниях по закрепленным абразивам (а) и стали 20X13(HB460) по кремню и стали 12X18H10T со смазкой (б): 1 – после электрополирования; 2 – после наноструктурирующего выглаживания

Испытания на усталостную выносливость по ГОСТ 23026-78 образцов из цементованной стали 20X (HRC55), поверхностный слой которых после чистового точения обработан шлифованием, алмазным и наноструктурирующим выглаживанием, осуществлялись на машине МУИ-6000. Установлено, что в условиях малоциклового нагружения образцы, обработанные наноструктурирующим выглаживанием, имеют многократный (до 10 раз) запас усталостной выносливости по сравнению с образцами, обработанными выглаживанием природным алмазом и шлифованием (рис. 21), что объясняется высоким уровнем твердости и пластичности наноструктурированного слоя.

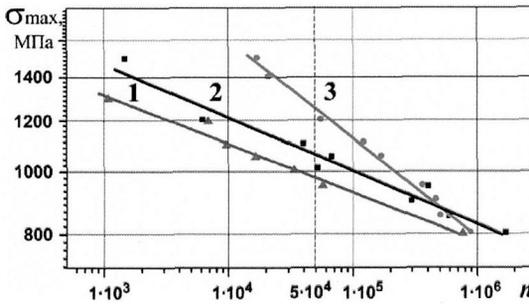


Рис. 21. Кривые усталостной выносливости образцов из стали 20X(HRC55):

1 – шлифование (круг 24A16HCM2K; $v_{ш}=35$ м/мин; $S_{вр}=0,02$ мм/мин); 2 – выглаживание природным алмазом ($P_b=350$ Н, $S_b=0,04$ мм/об, $v_b=80$ м/мин; $n_{рх}=1$); 3 – наноструктурирующее выглаживание ($P_b=350$ Н, $S_b=0,04$ мм/об, $v_b=20$ м/мин; $n_{рх}=3$);

Возможности управления эффективностью пластического структурообразования на основе интегрального параметра кратности нагружения N_c , определяемого силой выглаживания P_b , подачи S_b и количеством рабочих ходов инструмента $n_{рх}$, устанавливаются по трудоемкости процесса T_n , требуемым параметрам физико-механических свойств $Y_{фм}$ и шероховатости поверхностного

слоя $Y_{ш}$. Трудоемкость процесса $T_{п}$ зависит от площади поверхности наноструктурируемого слоя и определяется в соответствии с обоснованной скоростью обработки. Увеличение кратности нагружения до $N_{сmax}$ ограничивается критическим состоянием сдвиговой неустойчивости деформируемого материала. По уровню экономически обоснованной трудоемкости процесса $T_{пэ}$ устанавливается достижимый уровень шероховатости поверхностного слоя $Y_{шд}$ и нижняя граница параметров физико-механических свойств $Y_{фмн}$ (рис. 22). Верхняя граница параметров физико-механических свойств $Y_{фмв}$ и кратности нагружения $N_{ст}$ ограничивается допустимой трудоемкостью процесса $T_{пд}$.

Пример установления взаимосвязи микротвердости тонкого поверхностного слоя $HV_{0,025}$, среднего арифметического отклонения профиля поверхности Ra_v и кратности нагружения N_c для наноструктурирующего выглаживания уплотнительных поверхностей шпинделя задвижки высокого давления ПС.21006-020.В.01 из стали 20Х13 с режимами обработки $P_v=350$ Н, $v_v=50$ м/мин, $S_v=0,04$ мм/об и $n_{рх}=2, 3, 4, 5$ приведен на рисунке 22б.

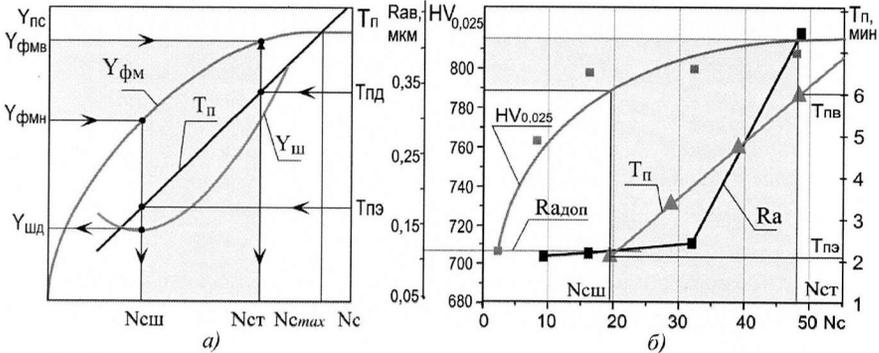


Рис. 22. Схема методического подхода (а) и пример реализации управления эффективностью пластического структурообразования по критериям шероховатости и физико-механических свойств поверхностного слоя (б)

Стойкость инструментального материала определялась длиной пути пробега при обеспечении требуемой шероховатости обработанной поверхности. Установлено, что по критерию шероховатости $Ra < 100$ нм стойкость $L_{и}$ инструментального материала ПСТМ DBN при скорости выглаживания $v_v=20$ м/мин в условиях наружного охлаждения СОТС составляет ~ 8000 м. Увеличение ресурса инструментального материала рабочей части индентора до семи раз обеспечивается регулируемым поворотом индентора (Патент РФ №120035).

Разработанная технология наноструктурирующего выглаживания внедрена при производстве деталей нефтяных погружных насосов и трубопроводной арматуры высокого давления и позволила обеспечить кратное повышение их эксплуатационных свойств, а также снизить трудоемкость изготовления в 1,25...1,6 раза за счет исключения операций шлифования и полирования.

Кроме того, благодаря созданию инструмента и возможности реализации наноструктурирующего выглаживания на многоцелевых центрах (рис. 23) соз-

даны новые технологические процессы обработки прецизионных деталей за один установ, позволяющие уменьшить в три и более раза требуемое количество станочного оборудования. Годовой экономический эффект от внедрения разработанной финишной технологии составил более 15 млн. руб.

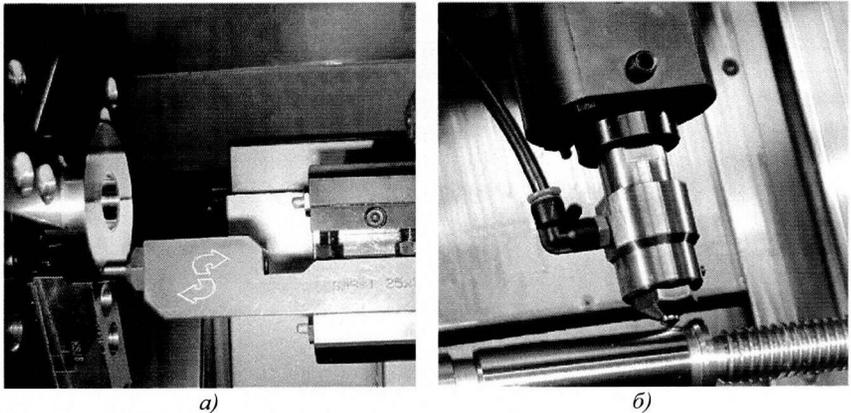


Рис. 23. Обработка пяты погружного насоса инструментом с демпфером сухого трения (а) и шпинделя задвижки высокого давления инструментом с внутренним теплопроводом (б) на токарно-фрезерном центре Multus B300-W

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Обоснована и реализована новая патентозащищенная финишная технология наноструктурирующего выглаживания, позволяющая формировать наноструктурное состояние и субмикрорельеф поверхностного слоя и обеспечивающая при серийном изготовлении прецизионных деталей из конструкционных сталей на металлообрабатывающих центрах кратное повышение эксплуатационных свойств.

2. Разработаны методология и теоретические основы решения задач управления пластическим структурообразованием и скоростью наноструктурирующего выглаживания конструкционных сталей по критериям качества поверхностного слоя и трудоемкости процесса.

3. Определены параметры и критерии управления пластическим структурообразованием поверхностного слоя многократным фрикционно-силовым нагружением полусферическим индентором и разработаны методы их определения на основе динамического конечно-элементного и физического моделирования процесса.

4. Выявлены условия возбуждения автоколебаний индентора инструмента при повышенном фрикционно-силовом нагружении поверхностного слоя и создана математическая модель динамики наноструктурирующего выглаживания, позволяющая определять скорость обработки и параметры демпфера инструмента по критерию динамической устойчивости процесса.

5. Разработана теплофизическая модель наноструктурирующего выглаживания, позволяющая устанавливать взаимосвязь максимальной температуры в очаге деформации со скоростью обработки и параметрами теплоотводящей системы инструмента.

6. Создана классификация теплоотводящих систем инструмента и на основе численного и физического моделирования процесса определены эффективные варианты их построения, позволившие реализовать наноструктурирование поверхностного слоя закаленных и низкоотпущенных сталей типа 20X инструментальным материалом на основе плотных модификаций нитрида бора со скоростью 20...40 м/мин и сталей типа 20X13 синтетическими алмазами со скоростью 20...50 м/мин.

7. Создан комплекс патентозащищенных видов инструмента и технологической оснастки для настройки технологических режимов, позволивший реализовать наноструктурирующее выглаживание при обработке прецизионных деталей на металлообрабатывающих центрах. Установлено, что материал рабочего элемента индентора DBN при наноструктурирующем выглаживании стали 20X созданным инструментом на установленных режимах обеспечивает по критерию шероховатости $Ra \leq 0,1$ мкм путь пробега до 56000 м, синтетический алмаз АСПМ-3 по стали 20X13 — до 31500 м.

8. Установлены технологические режимы наноструктурирующего выглаживания закаленных и низкоотпущенных сталей типа 20X и 20X13, обеспечившие возможность стабильного формирования в поверхностном слое субмикрорельефа и физико-механических свойств, соответствующих уровню наноматериалов и наноструктурных покрытий: твердость вдавливания 9,2...13 ГПа, удельная контактная твердость 0,04...0,06.

9. Выявлено, что поверхностный слой после обработки наноструктурирующим выглаживанием в сравнении с технологией электрополирования обеспечивает снижение интенсивности износа сталей типа 20X13 и цементованной 20X при испытании по закрепленному абразиву кремню соответственно в 1,6 и 2 раза, стали 20X при трении по пластине из стали 45(HRC50) в безокислительной среде — в 4,5 раза. Установлено, что сформированный наноструктурирующим выглаживанием поверхностный слой обладает высокой температурной стабильностью и сохраняет физико-механические и структурные свойства при нагреве до 400 °С.

10. Определено, что наноструктурирующее выглаживание цементованной и термоупрочненной стали 20X обеспечивает повышение малоциклового усталостной выносливости образцов по сравнению с технологией шлифования в 10 и более раз.

11. Показано, что годовой экономический эффект от внедрения разработанной технологии наноструктурирующего выглаживания при изготовлении прецизионных деталей высоконагруженного нефтепромыслового оборудования за счет исключения комплекса трудоемких операций обкатки, притирки и полирования поверхностных слоев составляет более 15 млн. рублей.

ОСНОВНЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК:

1. Кузнецов В.П., Смолин И.Ю., Дмитриев А.И., Смирнов С.В., Макаров А.В., Киряков А.Е., Юровских А.С. Конечно-элементное моделирование наноструктурирующего выглаживания // Физическая мезомеханика. – 2011. – Т.16. – №6. – С.87–97.
2. Кузнецов В.П., Никонов А.Ю., Дмитриев А.И., Псахье С.Г., Макаров А.В. Исследование механизмов наноструктурирования поверхностного слоя при пластическом деформировании скользящим индентором. Моделирование на атомном масштабе // Физическая мезомеханика. – 2012. – №3.
3. Кузнецов В.П. Имитационное моделирование влияния параметров технологической системы на виброустойчивость выглаживания поверхностей деталей // Металлообработка. – 2010. - №1(55). – С. 7–15.
4. Кузнецов В.П. Методика определения параметров инструмента для упругого выглаживания деталей на основе моделирования нелинейной динамики процесса // Машиностроение и инженерное образование. – 2009. – №3(20). – С. 18 – 26.
5. Кузнецов В.П. Методика настройки оптимального натяга выглаживателя с упругим демпфером для отделочной обработки деталей на токарно-фрезерном центре // Вестник УГАТУ. – 2009. - №4(33). – С. 71–75.
6. Кузнецов В.П., Горгоц В.Г., Дмитриева О.В. Инженерия плосковершинного регулярного микрорельефа поверхности при многоцелевой обработке // Вестник УГАТУ. – 2009. - №4(33). – С. 113–115.
7. Кузнецов В.П. , Дмитриева О.В. Экспериментально-расчетный метод оценки упругодемпфирующих свойств элементов выглаживающего инструмента // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2009. - №3. – С.24–25.
8. Кузнецов В.П., Ильичев С.А., Горгоц В.Г. Динамика упругого выглаживания поверхностей деталей с отверстиями на токарно-фрезерных центрах // Вестник машиностроения. – 2009. - №11. – С. 71–75.
9. Кузнецов В.П., Горгоц В.Г. Математическое моделирование нелинейной динамики процессов упругого выглаживания поверхностей деталей // Вестник машиностроения. – 2008. - №12. –С. 61–65.
10. Горгоц В.Г., Кузнецов В.П., Губанов В.Ф., Ильичев С.А. Оптимизация процесса алмазного выглаживания деталей компрессорной техники // Компрессорная техника и пневматика. – 2006. - №8. – С. 33–35.
11. Горгоц В.Г., Кузнецов В.П., Губанов В.Ф. Теоретический анализ динамики процесса алмазного выглаживания поверхностей деталей методом фазовой плоскости // Технология машиностроения. – 2006. - №11(53) – С.19–24.
12. Кузнецов В.П., Дмитриева О.В., Макаров А.В., Киряков А.Е. Экспериментальные и теоретические исследования формирования субмикрощероховатых поверхностей деталей выглаживанием на токарно-фрезерных центрах // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т.319. – №2. – С.40–45.
13. Кузнецов В.П., Дмитриева О.В. Моделирование и исследование фор-

мирования плосковершинного микрорельефа поверхностей трения со смазочными микрокарманами при многоцелевой обработке деталей // Известия ТПУ. – 2011. – Т.319. – №2. – С.35–40.

14. Кузнецов В.П., Макаров А.В., Саврай Р.А., Поздеева Н.А., Малыгина И.Ю., Киряков А.Е. Формирование высококачественных поверхностей деталей из коррозионностойкой стали выглаживанием специальным инструментом с узлом динамической стабилизации на токарно-фрезерном центре // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2011. – №8. – С. 3–15.

15. Кузнецов В.П., Макаров А.В., Поздеева Н.А., Саврай Р.А., Юровских А.С., Малыгина И.Ю., Киряков А.Е. Повышение прочности, теплостойкости и износостойкости деталей из цементированной стали 20Х наноструктурирующим фрикционным выглаживанием на токарно-фрезерных центрах // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2011. – №9. – С. 3–13.

16. Кузнецов В.П., Макаров А.В., Осинцева А.Л., Юровских А.С., Саврай Р.А., Роговая С.А., Киряков А.Е. Упрочнение и повышение качества поверхности деталей из аустенитной нержавеющей стали алмазным выглаживанием на токарно-фрезерном центре // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2011. – №11. – С. 16–26.

17. Кузнецов В.П., Макаров А.В., Юровских А.С., Саврай Р.А., Киряков А.Е. Износостойкость поверхностей деталей из стали 20Х13 с субмикро- и нанокристаллическими слоями, сформированными выглаживанием на токарно-фрезерном центре // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия Технические науки. – 2011. – Т.13. – №4(3). – С. 776–781.

18. Dmitriev A.I., Nikonov A.Yu., Kuznetsov V.P. The features of structure transformation caused by nano-burnishing process // Наносистемы: Физика. Химия. Математика. – 2011. – Т.2. – №3. – С. 53–59.

Статьи в сборниках трудов и материалах конференций:

1. Кузнецов В.П. Моделирование и динамическая стабилизация нановыглаживания прецизионных поверхностей при многоцелевой обработке деталей / Материалы VI Российской научно-технической конференции «Механика микронеоднородных материалов и разрушение (Электронный ресурс). Екатеринбург: ИМАШ УрО РАН, 2010. Электрон. оптич. диск, вкладка «Публикации».

2. Кузнецов В.П. Моделирование нелинейной динамики выглаживания прецизионных поверхностей деталей на станках с ЧПУ // «Инновация, экология и ресурсосберегающие технологии на предприятиях машиностроения, авиационного, транспорта и сельского хозяйства»: Труды IX международной научно-технической конференции. – Ростов н/Д: ИЦ ДГТУ, 2010. – С. 582–587.

3. Кузнецов В.П. Синтез инструмента с узлом динамической стабилизации для выглаживания поверхностей деталей на токарно-фрезерных центрах // «Инновация, экология и ресурсосберегающие технологии на предприятиях машиностроения, авиационного, транспорта и сельского хозяйства»: Труды IX международной научно-технической конференции. – Ростов н/Д: ИЦ ДГТУ, 2010. – С. 592–599.

4. Кузнецов В.П., Макаров А.В., Киряков А.Е. Экспериментальные исследования формирования поверхностного слоя деталей при финишной обработке

выглаживанием на токарно-фрезерных центрах // «Современные проблемы машиностроения»: Труды V Международной научно-технической конференции. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – С. 571–575.

5. Кузнецов В.П. Формирование качества функциональных поверхностей деталей из коррозионностойких сталей при финишной обработке выглаживанием на токарно-фрезерных центрах // «Инновационные технологии в автоматизированном машиностроении и арматуростроении»: Материалы Международной научно-технической конференции – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2010. – С.41–53.

6. Кузнецов В.П., Иванов А.А. Контроль динамического внедрения индентора в обрабатываемую поверхность при выглаживании инструментом со встроенным оптоэлектронным преобразователем // «Инновационные технологии в автоматизированном машиностроении и арматуростроении»: Материалы Международной научно-технической конференции – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2010. – С.101–103.

7. Кузнецов В.П., Макаров А.В., Саврай Р.А., Малыгина И.Ю., Поздеева Н.А., Киряков А.Е. Технологические и материаловедческие аспекты финишной обработки выглаживанием коррозионностойких сталей на токарно-фрезерных центрах / Материалы V Российской научно-технической конференции «Ресурс и диагностика материалов и конструкций» (Электронный ресурс). – Екатеринбург: ИМАШ УрО РАН, 2011.

8. Кузнецов В.П., Макаров А.В., Осинцева А.Л., Юровских А.С., Роговая С.А. Влияние многопроходного выглаживания на структуру, прочностные и трибологические характеристики поверхности нержавеющей аустенитной стали / «Ресурс и диагностика материалов и конструкций»: Тезисы V Российской научно-технической конференции. – Екатеринбург: ИМАШ УрО РАН, 2011. – С. 82.

9. Кузнецов В.П., Макаров А.В., Поздеева Н.А., Саврай Р.А., Юровских А.С., Малыгина И.Ю., Киряков А.Е. Повышение износостойкости деталей из цементированной стали 20X наноструктурирующим фрикционным выглаживанием на токарно-фрезерных центрах // Создание и перспективы использования нанокристаллических материалов и нанотехнологий в промышленности: Тезисы докладов XII международной конференции «Дислокационная структура и механические свойства металлов и сплавов». – Екатеринбург: ИФМ УрО РАН. 13-16 июня 2011 г. – С. 82–83.

10. Кузнецов В.П., Макаров А.В., Поздеева Н.А., Саврай Р.А., Роговая С.А. Оптимизация технологических условий фрикционной наноструктурирующей обработки стальных поверхностей // IV Всероссийская конференция по наноматериалам. Москва. 01-04 марта 2011 г. / Сборник материалов. – М.: ИМЕТ РАН, 2011. – С.327.

11. Kuznetsov V.P., Nikonov A.Y. and Dmitriev A.I. Molecular-dynamics investigation of nanoburnishing process // Proc of II International Conference on Particle-Based Methods – Fundamentals and Applications (PARTICLES 2011), Barcelona, Spain, 26-28 October 2011.- p159/1-p159/8 (electronic resource).

12. Дмитриев А.И., Никонов А.Ю., Кузнецов В.П. Особенности изменения структуры поверхностного слоя кристаллических тел при моделировании

процесса выглаживания // Труды XVII международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам ВМСППС 2011, г. Алушта, (Украина) 25-31 мая 2011. с. 328–330.

13. Dmitriev A.I., Nikonov A.Yu., Kuznetsov V.P. The features of structure transformation caused by nano-burnishing process // Proceedings of XXXIX International Summer School. Conference Advanced Problems in Mechanics 2011, St. Petersburg (Repino), July 1–5 2011, p. 114–120.

14. Дмитриев А.И., Никонов А.Ю., Кузнецов В.П. Молекулярно-динамическое исследование процесса нановыглаживания кристаллических тел // Тезисы докладов Международной конференции по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов, 5–9 сентября 2011 г., Томск, Россия. – Томск: ИФПМ СО РАН, 2011. – С. 104–105.

15. А.И.Дмитриев, А.Ю.Никонов, В.П.Кузнецов, Псахье С.Г. Моделирование локального контакта кристаллических тел в условиях сдвигового нагружения // Труды IX Международной конференции по Неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ'2012) г. Алушта, (Украина) 25-31 мая 2012.

16. Кузнецов В.П. Интегральный параметр фрикционно-силового нагружения и оценка накопленной пластической деформации сдвига при наноструктурирующем выглаживании // Вестник Курганского государственного университета. Серия «Технические науки». Выпуск 7. – 2012. – №2(24). – С.113–119.

17. Кузнецов В.П. Методология решения задач управления режимами наноструктурирующего выглаживания конструкционных сталей // Сборник научных трудов международной научно-технической конференции «Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки». Ростов-на-Дону, 28 февраля 2013 г. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2013. – С.254–269.

Учебные пособия:

1. Кузнецов В.П., Горгоц В.Г., Губанов В.Ф., Схиртладзе А.Г. Обеспечение требуемого качества поверхностей деталей на основе управления динамической системой процесса выглаживания: Учеб. пособие. Гриф УМО АМ. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2005. – 85 с.

Патенты:

1. Пат. 62554 Российская Федерация, U1 МПК В24В 39/02. Выглаживатель / Кузнецов В.П., Губанов В.Ф., Горгоц В.Г.; заявл. 02.05.2007; опубл. 27.04.2007, Бюл. №12 (ч.І). – 3с.

2. Пат. 88599 Российская Федерация, U1 МПК В24В 39/02. Индентор для выглаживания прерывистых поверхностей / Кузнецов В.П.; заявл. 30.06.2009; опубл.20.11.2009, Бюл. №29(ч.ІІІ). – 3с.

3. Пат. 89015 Российская Федерация, U1 МПК В24В 39/02. Динамическая опора индентора выглаживателя / Кузнецов В.П.; заявл. 26.08.2009; опубл.27.11.2009, Бюл. №29(ч.ІV). – 3с.

4. Пат. 2401731 Российская Федерация, С2 МПК В24В 39/02. Способ формирования плосковершинного регулярного микрорельефа выглаживанием / Кузнецов В.П., Горгоц В.Г., Ильичев С.А.; заявл. 04.07.2008; опубл. 20.10.2010, Бюл. № 29 (ч.ІІІ). – 4с.

5. Пат. 97671 Российская Федерация, U1 МПК В24В 39/00. Выглаживатель с оптоэлектронным датчиком виброперемещений индентора / Кузнецов В.П.; заявл. 26.05.2010; опубл.20.09.2010, Бюл. №26(ч.III). – 5с.

6. Пат. 110672 Российская Федерация, U1 МПК В24В 39/00. Выглаживатель с встроенным индикатором настройки рабочего зазора индентора/ Кузнецов В.П., Горгоц В.Г.; заявл. 01.07.2011; опубл. 27.11.2011, Бюл. №33. – 3с.

7. Пат. 114433 Российская Федерация, U1 МПК В24В39/02. Выглаживающий инструмент / Кузнецов В.П., Горгоц В.Г.; заявл. 08.11.2011; опубл. 27.03.2012, Бюл. № 9. – 3с.

8. Пат. 115281 Российская Федерация, U1 МПК В24В 39/02. Устройство для настройки вне станка усилия пластического деформирования в выглаживающем инструменте / Кузнецов В.П.; заявл. 21.11.2011; опубл. 27.04.2012. Бюл. №12. – 3с.

9. Пат. 115706 Российская Федерация, U1 МПК В24В39/00 В82В3/00. Инструмент для формирования на деталях трибосопряженных поверхностей с нанокристаллической структурой / Кузнецов В.П.; заявл. 09.11.2011; опубл. 10.05.2012. Бюл. №13. – 3с.

10. Пат. 2458777 Российская Федерация, С2 МПК В24В 39/02. Способ упрочняющей обработки поверхностей деталей выглаживанием / Кузнецов В.П., Макаров А.В., Кирыков А.Е., Саврай Р.А., Аникесв А.В.; заявл. 09.11.2010; опубл. 20.08.2012, Бюл. №23. – 4с.

11. Пат. 2458778 Российская Федерация, С2 МПК В24В 39/00. Способ формирования нанорельефа на поверхностях деталей двухпереходным выглаживанием / Кузнецов В.П.; заявл. 29.11.2010; опубл. 20.08.2012, Бюл. №23. – 5с.

12. Пат. 120226 Российская Федерация, МПК В24В 39/00, G01N1/00, G01N3/00 . Образец для исследования влияния поверхностного пластического деформирования на параметры состояния поверхностного слоя /Кузнецов В.П., Горгоц В.Г.; заявл. 03.04.12; опубл. 10.09.2012, Бюл. №25.

13. Пат. 120035 Российская Федерация МПК В24В 39/00; Инструмент с устройством поворота индентора / Кузнецов В.П., Горгоц В.Г.; заявл. 19.04.12; опубл. 10.09.2012, Бюл. №25.

14. Пат. 2460628 Российская Федерация, С2 МПК В24В 39/00 и В82В3/00. Способ наноструктурирующего упрочнения поверхностного слоя прецизионных деталей выглаживанием / Кузнецов В.П.; заявл. 09.02.2011; опубл.10.09.2012, Бюл. №25.

15. Пат. 120385 Российская Федерация, МПК В24В 39/00 G01N3/00; Инструмент со встроенной системой контроля режимов выглаживания / Кузнецов В.П., Иванов А.А., Горгоц В.Г.; заявл. 26.04.2012; опубл. 20.09.2012; Бюл. №.26.

16. Пат. 126979 Российская Федерация, МПК В24В 39/00 В82В 3/00; Инструмент с системой контроля температуры поверхностного слоя в контактной зоне очага деформации для наноструктурирующего выглаживания / Кузнецов В.П.; заявл. 01.11.2012; опубл. 20.04.2013; Бюл. №11.

17. Пат. 129443 Российская Федерация, МПК В24В 39/04; Выглаживающий инструмент с охлаждением индентора / Кузнецов В.П., Горгоц В.Г., Кузнецова Е.М.; заявл. 08.10.2012; опубл. 27.06.2013; Бюл. №18.

КУЗНЕЦОВ Виктор Павлович

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ
НАНОСТРУКТУРИРУЮЩЕГО ВЫГЛАЖИВАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ
ПРЕЦИЗИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

Автореферат

Подписано в печать
Печать офсетная
Заказ

Формат 60×84 1/16
Усл. печ. л. 2,0
Тираж 100 экз.

Бумага тип №1
Уч.-изд. л. 2,0

Редакционно-издательский центр Курганского государственного университета
6400669, г. Курган, ул. Гоголя, 25