

ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 621.787.6:621.83.05

СВИРЕПА  
Дмитрий Михайлович

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ВНУТРЕННЕЙ  
ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАГНИТНО-  
ДИНАМИЧЕСКИМ РАСКАТЫВАНИЕМ**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук  
по специальности 05.02.08 – «Технология машиностроения»

Могилев 2013

Работа выполнена в Государственном учреждении высшего профессионального образования «Белорусско-Российский университет»

Научный руководитель **Довгалец Александр Михайлович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет».

Официальные оппоненты: **Мрочек Жорж Адамович**, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения» УО «Белорусский национальный технический университет»;

**Федоренко Алексей Михайлович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет».

Оппонирующая организация: УО «Полоцкий государственный университет».


Защита состоится 28 июня 2013 г. в 14.00 часов на заседании Совета по защите диссертаций К 02.18.01 при Государственном учреждении высшего профессионального образования «Белорусско-Российский университет» по адресу: 212000, г. Могилев, пр-т Мира, 43, ауд. 323.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного учреждения высшего профессионального образования «Белорусско-Российский университет».

Автореферат разослан            мая 2013 г.

Ученый секретарь

Совета по защите диссертаций,

доктор физико-математических наук, профессор  В. И. Борисов

## ВВЕДЕНИЕ

В машиностроении существует широкая номенклатура деталей имеющих отверстия, к качеству поверхности которых предъявляются высокие требования. К таким деталям относятся гильзы, цилиндры, втулки и т. д. Качество этих деталей во многом определяется состоянием их поверхностного слоя, непосредственно участвующего в работе и формируемого на финишных операциях технологического процесса.

Важным направлением повышения качественных характеристик деталей принято считать использование физико-механических способов обработки, позволяющих сформировать модифицированный поверхностный слой с высокими эксплуатационными характеристиками.

Одним из эффективных способов повышения качества и эксплуатационных свойств поверхностей деталей машин является поверхностное пластическое деформирование (ППД). Поверхностное пластическое деформирование меняет микроструктуру и физико-механические свойства поверхностного слоя металла, формирует остаточные напряжения сжатия и микрорельеф поверхности, повышает усталостную прочность, контактную выносливость и износостойкость деталей.

Большой вклад в разработку теоретических основ упрочнения деталей машин методами ППД внесли И. В. Кудрявцев, Е. Г. Коновалов, Д. Д. Папшев, Ю. Г. Проскуряков, Ю. Г. Шнейдер, П. Г. Алексеев, В. М. Торбило, Л. А. Хворостухин, В. М. Смелянский, М. М. Жасимов, П. И. Ящерицын, А. П. Минаков, И. П. Филонов, Ж. А. Мрочек, Г. Ф. Шатуров и другие.

Наиболее эффективными оказались динамические методы ППД, позволяющие получать упрочненную поверхность деталей с высокими качественными характеристиками. К динамическим методам ППД относятся импульсно-силовое вибронакатывание, центробежно-ударная и пневмоцентробежная обработки, импульсно-ударное упрочнение, безабразивная ультразвуковая финишная обработка и другие.

Однако известные динамические методы ППД, осуществляемые инструментами упругого типа, сложны в реализации, так как требуют специальных технологических приспособлений или дополнительных внешних источников энергии для сообщения деформирующим элементам колебательных движений. Кроме того, указанные методы не позволяют эффективно снижать микронеровности поверхности с  $R_a$  6,3–1,6 до 0,8–0,2 мкм и обеспечивать глубину упрочнения более 0,2 мм.

Перспективным направлением развития ППД является метод магнитно-динамического упрочнения, при котором энергия магнитного поля инструмента преобразуется в колебательные движения деформирующих шаров, взаимодействующих с поверхностью детали. В связи с этим разработанный способ магнитно-динамического упрочнения внутренней цилиндрической

поверхности деталей обеспечивает интенсивное снижение микронеровностей поверхности с Ra 6,3–1,6 до 0,8–0,2 мкм, позволяет получить упрочненный поверхностный слой на глубину более 0,25 мм, имеющий высокие эксплуатационные свойства.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь с крупными научными программами (проектами) и темами.**

Тема диссертационной работы соответствует приоритетному направлению фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 гг., утвержденному Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 19.04.2010 г. № 585 «Высокоэнергетические процессы в технологической среде и на границе раздела фаз при формообразовании, упрочнении, обработке и испытании материалов, формировании покрытий».

Исследования по теме диссертации проводились в рамках научно-исследовательской работы ГБ № 0616 «Новые технологии повышения производственного ресурса инструментов и узлов металлорежущих станков для условий автоматизированного производства» (2005–2010 гг.) (номер гос. регистрации 2006560) и научно-исследовательской работы ГБ № 1118 «Повышение параметров качества поверхностного слоя инструментов, технологической оснастки, деталей технических систем с оптимизацией их конструктивных, технологических и эксплуатационных характеристик воздействием тлеющего разряда и ППД» (2011–2015 гг.) (номер гос. регистрации 20111335), выполняемых на кафедре «Металлорежущие станки и инструменты» Белорусско-Российского университета.

**Цель и задачи исследований.** *Целью* работы является повышение эффективности отделочно–упрочняющей обработки внутренней цилиндрической поверхности деталей машин с использованием магнитно-динамического раскатывания (МДР).

Для достижения цели необходимо было решить следующие задачи:

- разработать высокопроизводительный способ магнитно-динамического раскатывания, обеспечивающий сообщение колебательных движений деформирующим шарам за счет энергии магнитного поля инструмента, осуществляющим интенсивное снижение микронеровностей поверхности с Ra 6,3–1,6 до 0,8–0,2 мкм;
- разработать инструмент для реализации способа МДР, включающий магнитную систему для сообщения радиальных колебаний деформирующим шарам. Получить рекомендации по проектированию магнитной системы инструмента. Определить стойкость деформирующих шаров инструмента;
- осуществить математическое моделирование процесса магнитно-динамического раскатывания, установить взаимосвязь кинетостатических

характеристик движения деформирующего шара в магнитном поле и обеспечить прогнозирование шероховатости поверхности;

– исследовать характеристики поверхности, упрочненной магнитно-динамическим раскатыванием (шероховатость, микротвердость, глубина упрочнения, точность и износостойкость);

– определить перспективы использования процесса магнитно-динамического раскатывания. Внедрить технологическую операцию магнитно-динамического упрочнения и инструмент в производство.

*Объект исследования* – процесс магнитно-динамического раскатывания.

*Предмет исследования* – качественные характеристики упрочненной поверхности детали.

### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Способ магнитно-динамического раскатывания, при котором упрочнение поверхности детали осуществляют деформирующими шарами, перемещаемыми вдоль детали, отличающийся тем, что шары получают рабочие движения (вращение вокруг оси детали и радиальные колебания) от вращаемого, периодически действующего магнитного поля инструмента, позволяющий обеспечить импульсно-ударную упрочняющую обработку с осевой подачей от 20 до 1000 мм/мин, снижение микронеровностей поверхности заготовки из стали 45 с Ra 6,3–1,6 до 0,8–0,2 мкм, упрочнение поверхностного слоя на глубину до 600 мкм и повышение износостойкости поверхности в 2,1– 2,3 раза.

2. Теоретически и экспериментально определенные параметры магнитной системы (диаметр деформирующих шаров, диаметр обоймы магнитной системы, диаметр и высота цилиндрического постоянного магнита, количество постоянных магнитов и деформирующих шаров) магнитно-динамического раскатника, преобразующего энергию вращения инструмента в колебательные движения деформирующих шаров и обеспечивающего их импульсно-ударное взаимодействие с упрочняемой поверхностью заготовки.

3. Математическая модель процесса магнитно-динамического раскатывания, учитывающая движение деформирующих шаров во вращаемом, периодически действующем магнитном поле инструмента, позволяющая определить траекторию и характеристики движения центра масс деформирующих шаров в зависимости от параметров процесса упрочнения, силу удара деформирующего шара о заготовку и осуществлять прогнозирование величины шероховатости упрочняемой поверхности.

4. Аналитические зависимости для определения силы взаимодействия деформирующего шара с источником магнитного поля, учитывающие угловое расположение деформирующего шара по отношению к источнику магнитного поля инструмента, позволяющие установить взаимосвязь параметров движения деформирующего шара с характеристиками магнитного поля инструмента.

5. Результаты исследования влияния режимов магнитно-динамического раскатывания на шероховатость поверхности, позволившие оптимизировать параметры упрочняющей обработки при обеспечении минимальной шероховатости поверхности:  $n = 2450 \text{ мин}^{-1}$  – для стали 45 (180–200 HB),  $n = 3100 \text{ мин}^{-1}$  – для стали 45 (42–45 HRC); диаметр деформирующих шаров раскатника  $D_{ш} = 13 \text{ мм}$  – для обработки стали 45 (180–200 HB);  $D_{ш} = 8 \text{ мм}$  – для обработки стали 45 (42–45 HRC).

#### **Личный вклад соискателя.**

Соискателем лично получены следующие результаты:

– разработаны инструмент и способ магнитно-динамического раскатывания, отличающиеся обеспечением динамического деформирования поверхности заготовки деформирующими шарами на основе использования энергии вращаемого, периодически действующего магнитного поля;

– создана математическая модель движения деформирующих шаров под действием вращаемого, периодически действующего магнитного поля, обеспечивающая получение аналитических зависимостей для определения силы удара деформирующего шара о деталь, силы взаимодействия деформирующего шара с источником магнитного поля, величины шероховатости поверхности после магнитно-динамического раскатывания;

– определены характеристики упрочненной поверхности: шероховатость, точность диаметрального размера, микротвердость, глубина упрочнения и износостойкость.

Постановка целей и задач исследований, анализ полученных результатов проводились совместно с научным руководителем канд. техн. наук, доц. А. М. Довгалевым. В совместных работах с А. М. Довгалевым, ст. преподавателем Д. М. Рыжанковым и ассистентом С. А. Сухоцким соискатель принимал непосредственное участие на всех этапах планирования и проведения исследований, обработки результатов и подготовки публикаций. Результаты, полученные соавторами работ, в диссертации не рассматриваются.

**Апробация результатов диссертации.** Основные положения работы доложены и обсуждены на следующих международных и республиканских научно-технических конференциях: «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности» (2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2011), «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2012), «Развитие приграничных регионов Беларуси и России на современном этапе: проблемы и перспективы» (2006) в Белорусско-Российском университете, «Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении» (Минск, 2012).

**Опубликованность результатов диссертации.** По теме диссертации опубликованы 42 печатные работы (8 авторских листов), в том числе статей в рецензируемых журналах, включенных в список научных изданий Республики

Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований – 6 (2,8 авторских листа), материалов или тезисов докладов научных конференций – 23, патентов Республики Беларусь на изобретение – 13.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа представлена на 128 страницах машинописного текста, содержит 4 таблицы, 53 рисунка. Состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения и приложений. Список использованных источников включает 154 наименования, включая список публикаций соискателя – 45 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

**В первой главе** представлен анализ существующих статических и динамических методов ППД для упрочнения поверхности отверстий. Установлено, что динамические методы упрочняющей обработки обеспечивают формирование микрорельефа поверхности и модификацию поверхностного слоя, что повышает усталостную прочность, контактную выносливость деталей и износостойкость поверхности. Выявлены преимущества и недостатки существующих методов.

Метод импульсно-силового виброобкатывания позволяет повысить микротвердость поверхности, снизить ее шероховатость, сформировать регулярный рельеф. Однако он характеризуется большими силами деформирования, требует высокой точности исходного размера и приемлем для упрочняющей обработки жестких деталей.

Пневмоцентробежная и пневмоимпульсно-ударная обработки позволяют получить высокие эксплуатационные свойства поверхности деталей за счет повышения микротвердости, снижения шероховатости и формирования микрорельефа. Однако методы обеспечивают глубину упрочнения поверхностного слоя детали до 0,1 мм. Кроме того, для их осуществления дополнительно необходим внешний источник энергии – сжатый воздух.

Центробежно-ударное упрочнение отверстий обеспечивает снижение микронеровностей и упрочнение поверхности на значительную глубину, но для его реализации требуется вращение детали и наличие дополнительного высокоскоростного привода инструмента.

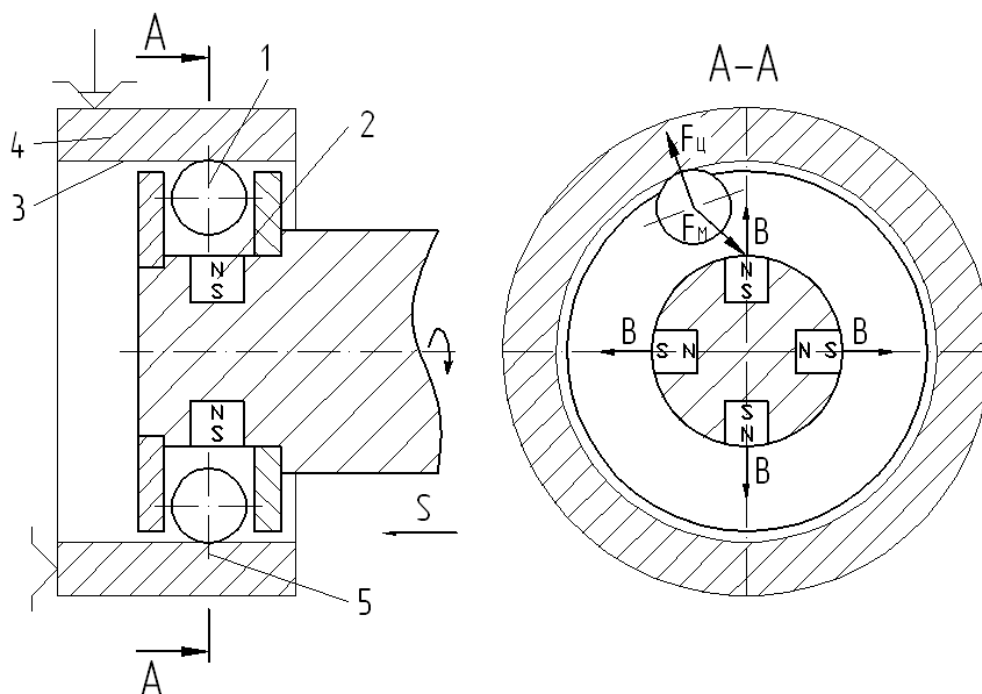
Безабразивная ультразвуковая финишная обработка (БУФО) характеризуется интенсивным снижением шероховатости поверхности. Для реализации метода требуется специальная установка, включающая ультразвуковой генератор и акустическую головку. Кроме того, метод осуществляется с малыми подачами (15–30 мм/мин), требует вращения детали и не позволяет обеспечить глубину упрочнения более 0,1 мм.

В связи с этим, актуальной задачей является разработка способа отделочно-упрочняющей обработки, обеспечивающего интенсивное снижение

микронеровностей поверхности деталей с Ra 6,3–1,6 до 0,8–0,2 мкм и упрочнение поверхности на глубину до 0,6 мм, реализуемого на специальном или универсальном оборудовании без вращения детали.

**Во второй главе** в соответствии с поставленной задачей разработан способ магнитно-динамического раскатывания, позволяющий осуществлять интенсивное снижение микронеровностей поверхности за счет преобразования энергии магнитного поля инструмента в колебательные движения деформирующих шаров, взаимодействующих с поверхностью детали (рисунок 1).

Согласно предложенному способу, деформирующие шары 1 и источники магнитного поля 2 инструмента вводят в отверстие 3 заготовки 4. Источникам магнитного поля 2 сообщают вращение, а инструменту – движение осевой подачи. При этом на деформирующие шары 1 периодически воздействуют вращаемым магнитным полем с частотой 160–840 Гц. Величину индукции источников магнитного поля инструмента принимают в пределах 0,2–1,2 Тл. Вектор индукции магнитного поля  $\vec{B}$  направляют радиально к упрочняемой поверхности. Под действием магнитного поля инструмента деформирующие шары 1 получают вращательное движение вокруг оси заготовки 4 и прижимаются центробежной силой  $F_{ц}$  к упрочняемой поверхности. Одновременно на деформирующие шары 1 периодически действует магнитная сила  $F_m$ , отрывающая их от поверхности обрабатываемой заготовки.

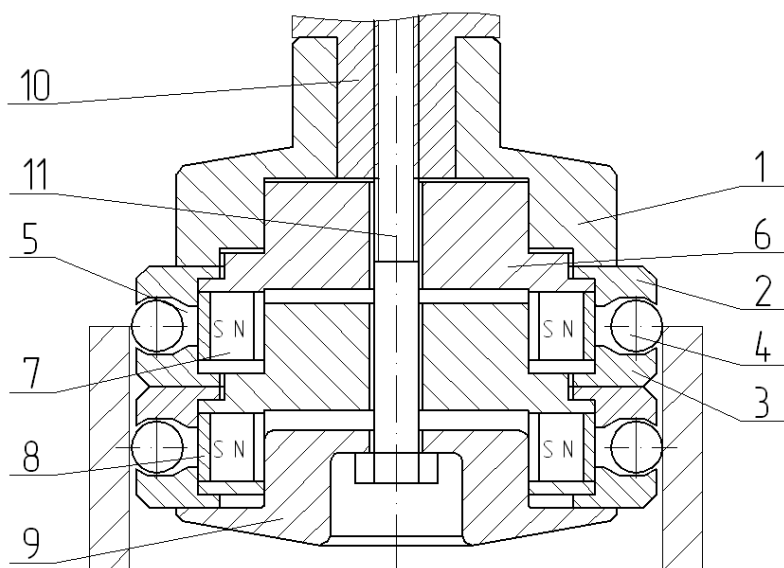


**Рисунок 1 – Схема способа магнитно-динамического упрочнения поверхности**

Вследствие этого деформирующие шары 1 приобретают радиальные колебательные движения в плоскости их вращения с амплитудой 1–5 мм (в



пределах величины радиального зазора между поверхностью заготовки 4 и магнитной системой инструмента) и осуществляют динамическое поверхностное пластическое деформирование.



**Рисунок 2 – Конструкция многосекционного магнитно-динамического раскатника**

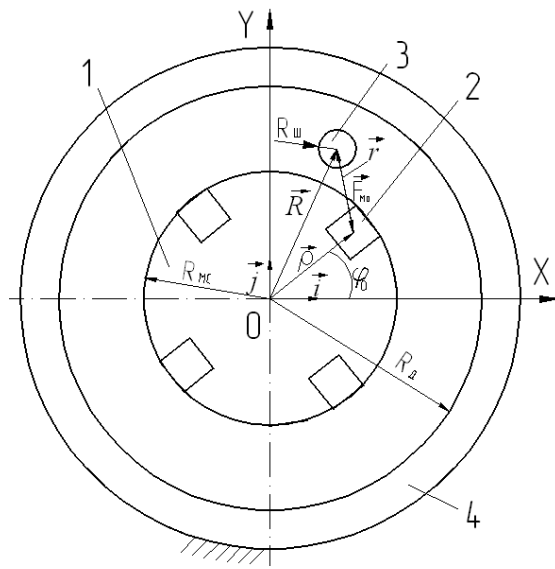
Инструмент содержит: корпус 1; диски 2, 3; деформирующие шары 4; кольцевую камеру 5; секции, включающие магнитную систему в виде обоймы 6 с цилиндрическими постоянными магнитами 7 и магнитопроводными вставками 8. Для закрепления инструмента в шпинделе станка предусмотрены шайба 9, оправка 10 и винт 11.

Количество секций инструмента принимают равным отношению длины обрабатываемой детали к расстоянию между смежными рядами деформирующих шаров. Это позволяет многократно уменьшить длину рабочего хода и повысить производительность упрочняющей обработки.

Получены рекомендации по выбору параметров магнитной системы инструмента: диаметра деформирующих шаров; диаметра обоймы магнитной системы; высоты и диаметра цилиндрического постоянного магнита; количества постоянных магнитов и деформирующих шаров.

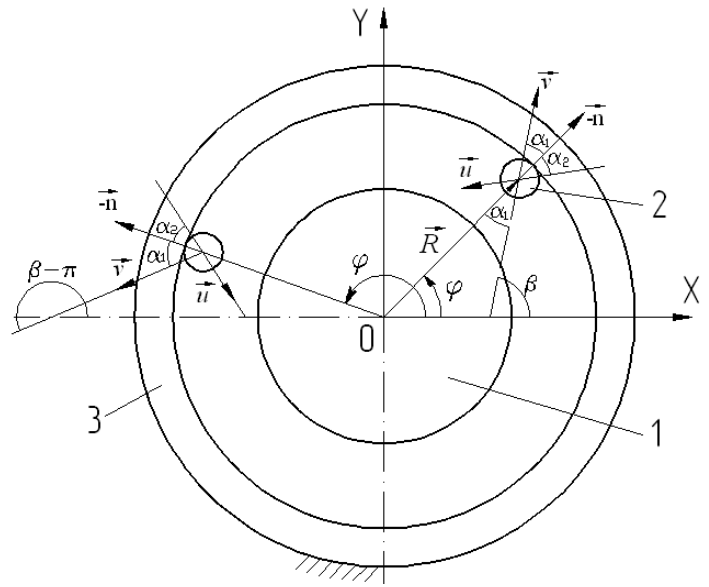
**В третьей главе** представлена математическая модель созданного процесса магнитно-динамического раскатывания, при котором деформирующие шары получают вращательное движение вокруг оси отверстия детали и колебательные движения в плоскости их вращения под действием периодического вращаемого магнитного поля, создаваемого магнитной системой (МС) инструмента. При этом деформирующие шары периодически взаимодействуют с упрочняемой поверхностью детали и осуществляют ее динамическое упрочнение.

Для реализации способа МДР разработана конструкция многосекционного раскатника, содержащего магнитную систему с равномерно расположенными источниками магнитного поля, преобразующую энергию вращения инструмента в колебательные движения деформирующих шаров, осуществляющих импульсно-ударную упрочняющую обработку (рисунок 2).



1 – магнитная система инструмента; 2 - источник магнитного поля; 3 - деформирующий шар; 4 - обрабатываемая деталь

**Рисунок 3 – Схема движения деформирующего шара от магнитной системы к детали**



1 – магнитная система инструмента, 2 – деформирующий шар, 3 – обрабатываемая деталь

**Рисунок 4 – Схема ударного взаимодействия деформирующего шара с деталью**

В соответствии с расчетной схемой, представленной на рисунке 3, получена система дифференциальных уравнений, описывающих динамику движения деформирующих шаров под действием магнитного поля инструмента, позволяющая осуществлять численное интегрирование:

$$\begin{cases} \dot{x} = X; \\ \dot{y} = Y; \\ \dot{X} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^{2n} \varphi(r) \cdot \frac{\rho \cdot \cos(\omega t + \varphi_0 + \frac{2 \cdot \pi \cdot (k-1)}{n}) - x}{\sqrt{(\rho \cdot \cos(\omega t + \varphi_0 + \frac{2 \cdot \pi \cdot (k-1)}{n}) - x)^2 + (\rho \cdot \sin(\omega t + \varphi_0 + \frac{2 \cdot \pi \cdot (k-1)}{n}) - y)^2}} - \\ - f \cdot mg \cdot \frac{\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}}; \\ \dot{Y} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^{2n} \varphi(r) \cdot \frac{\rho \cdot \sin(\omega t + \varphi_0 + \frac{2 \cdot \pi \cdot (k-1)}{n}) - y}{\sqrt{(\rho \cdot \cos(\omega t + \varphi_0 + \frac{2 \cdot \pi \cdot (k-1)}{n}) - x)^2 + (\rho \cdot \sin(\omega t + \varphi_0 + \frac{2 \cdot \pi \cdot (k-1)}{n}) - y)^2}} - \\ - f \cdot mg \cdot \frac{\dot{y}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}}, \end{cases}$$

где  $\rho$  – расстояние между геометрическими центрами магнитной системы и источника магнитного поля инструмента;  $m$  – масса деформирующего шара;  $\omega$  – угловая скорость вращения источников магнитного поля инструмента;  $t$  – время движения деформирующего шара;  $\varphi_0$  – начальное смещение магнитной системы относительно координатной оси ОХ;  $n$  – число источников магнитного поля с одноименными полюсами.

Для определения кинетостатических характеристик деформирующего шара в момент его соприкосновения с упрочняемой поверхностью детали (рисунок 4) получены следующие зависимости:

$$\begin{cases} u_x = -k \cdot v_x \cdot (\cos(\alpha_1 + \alpha_2) + \sin(\alpha_1 + \alpha_2)); \\ u_y = -k \cdot v_y \cdot (\sin(\alpha_1 + \alpha_2) + \cos(\alpha_1 + \alpha_2)); \end{cases}$$

$$\alpha_1 = \beta - \varphi;$$

$$\alpha_2 = \arctg\left(\frac{\operatorname{tg}\alpha_1}{k}\right);$$

$$\varphi = \begin{cases} \arctg \frac{y_K}{x_K}; & x_K > 0; \quad y_K \geq 0; \\ \pi + \arctg \frac{y_K}{x_K}; & x_K < 0; \\ 2\pi + \arctg \frac{y_K}{x_K}; & x_K > 0; \quad y_K < 0; \\ \frac{\pi}{2}; & x_K = 0; \quad y_K > 0; \\ \frac{3\pi}{2}; & x_K = 0; \quad y_K < 0; \end{cases}$$

$$\beta = \begin{cases} \arctg \frac{v_y}{v_x}; & v_x > 0; \quad v_y \geq 0; \\ \pi + \arctg \frac{v_y}{v_x}; & v_x < 0; \\ 2\pi + \arctg \frac{v_y}{v_x}; & v_x > 0; \quad v_y < 0; \\ \frac{\pi}{2}; & v_x = 0; \quad v_y > 0; \\ \frac{3\pi}{2}; & v_x = 0; \quad v_y < 0, \end{cases}$$

где  $v_x$  – проекция вектора скорости деформирующего шара до удара о поверхность детали на ось ОХ;  $v_y$  – проекция вектора скорости деформирующего шара до удара о поверхность детали на ось ОУ;  $x_K$ ,  $y_K$  – соответствующие координаты геометрического центра деформирующего шара в конечный момент фазы движения деформирующего шара от магнитной системы к поверхности детали;  $u_x$  – проекция вектора скорости деформирующего шара после удара о поверхность детали на ось ОХ;  $u_y$  – проекция вектора скорости деформирующего шара после удара о поверхность детали на ось ОУ;  $\alpha_1$  – угол падения деформирующего шара;  $\alpha_2$  – угол отражения деформирующего шара;  $k$  – коэффициент восстановления,  $\varphi$  – угол

между положительным направлением оси ОХ и радиусом-вектором  $\vec{R}$ ,  $0 \leq \varphi < 2\pi$ ;  $\beta$  – угол между положительным направлением оси ОХ и вектором скорости деформирующего шара,  $0 \leq \beta < 2\pi$ .

Математическое моделирование позволило установить, что в процессе упрочняющей обработки деформирующие шары движутся по циклоиде и осуществляют ударное взаимодействие с поверхностью детали.

Расчетные и экспериментальные величины угловой скорости вращения деформирующих шаров, измеренные с помощью стробоскопа, отличаются в пределах 2–5 %, что подтверждает адекватность разработанной математической модели.

В работе получена аналитическая зависимость для расчета силы удара деформирующего шара о деталь, учитывающая время взаимодействия деформирующего шара с внутренней поверхностью заготовки:

$$\begin{cases} N_{\tau}^{\max} = \frac{2m}{T_{\tau}}(u_{\tau} - v_{\tau}); \\ N_n^{\max} = \frac{2m}{T_n}(u_n - v_n), \end{cases}$$

где  $T_{\tau}$  – время касательного удара;  $T_n$  – время нормального удара.

Определено время взаимодействия деформирующего шара с деталью с учетом вогнутой поверхности, косога удара и упругопластической деформации поверхности детали:

$$\begin{cases} T_{\tau} = 2,943 \left( \frac{5m}{4\gamma} \right)^{\frac{2}{5}} \cdot v_{\tau}^{\frac{1}{5}}; \\ T_n = 2,943 \left( \frac{5m}{4\gamma} \right)^{\frac{2}{5}} \cdot v_n^{\frac{1}{5}}; \end{cases} \quad \begin{cases} \gamma_{\tau} = \frac{2G}{3(1-\mu^2)} \cdot \sqrt{\frac{R_{ш} \cdot R_{д}}{R_{д} - R_{ш}}}; \\ \gamma_n = \frac{2E}{3(1-\mu^2)} \cdot \sqrt{\frac{R_{ш} \cdot R_{д}}{R_{д} - R_{ш}}}, \end{cases}$$

где  $\gamma_{\tau}$ ,  $\gamma_n$  – расчетные параметры учитывающие форму контактирующих поверхностей;  $E$  – модуль упругости детали;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $R_{ш}$  – радиус деформирующего шара;  $R_{д}$  – радиус отверстия упрочненной детали;  $G$  – модуль упругости второго рода детали.

Получены аналитические зависимости, которые позволяют определить силу взаимодействия деформирующего шара с постоянным цилиндрическим магнитом, входящим в магнитную систему инструмента, в зависимости от характеристик источника магнитного поля и положения деформирующего шара:

$$\begin{cases} F_x(r, \theta, \alpha) = -\frac{3\mu_0 \cdot p_{m1} \cdot p_{m2}}{4\pi r^4} [2 \cos \theta \cdot \cos(\theta - \alpha) - \sin \theta \cdot \sin(\theta - \alpha)]; \\ F_y(r, \theta, \alpha) = -\frac{3\mu_0 \cdot p_{m1} \cdot p_{m2}}{4\pi r^4} \cdot \sin(\theta - \alpha), \end{cases}$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $r$  – расстояние между геометрическими центрами постоянного магнита и деформирующего шара;  $p_{m1}$ ,  $p_{m2}$  – магнитные моменты постоянного магнита и деформирующего шара, находящегося в магнитном поле;  $\theta$  – угол смещения деформирующего шара относительно координатной оси ОХ;  $\alpha$  – угол, определяющий положение вектора  $\vec{p}_{m2}$ .

Параметры  $p_{m1}$  и  $p_{m2}$  определяются соответствующими зависимостями:

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{3 \cos \theta \sin \theta}{3 \cos^2 \theta - 1};$$

$$p_{m1} = \frac{4\pi B \left(\frac{h}{2}\right)^3}{2\mu_0}; \quad p_{m2} = \frac{(\mu - 1) \cdot H \cdot R_{III}^3}{\mu + 2},$$

где  $B$  и  $h$  – величина индукции магнитного поля и высота постоянного магнита соответственно;  $H$  – напряженность магнитного поля в точке, определяемой радиусом-вектором  $\vec{r}$ ;  $\mu$  – магнитная проницаемость среды.

С целью управления качеством формируемой поверхности при магнитно-динамическом раскатывании получена математическая зависимость шероховатости поверхности от параметров процесса упрочнения:

$$Rz_k = Rz_{ucx} \cdot \left(1 - \frac{\frac{2m}{T_n} (u_n - v_n) \cdot \left( Rz_{ucx} - \left( \frac{S_0^2}{8 \cdot R_{III}} + \frac{k_1 \cdot a_m}{2} \cdot \left(1 + \frac{R_{III} \cdot k_1 \cdot a_m}{S_0^2}\right) \right) \cdot \pi \left( \frac{R_{II}}{R_{III}} - 1 \right) \cdot 2(1 - 2 \cdot \mu)^2}{k' \cdot HB} \right)\right),$$

где  $Rz_{ucx}$  – исходная шероховатость поверхности детали, мкм;  $S_0$  – осевая подача инструмента, мм/об;  $k_1$  – коэффициент учитывающий величину деформации микронеровностей,  $a_m$  – максимальная величина смятия микронеровностей,  $k'$  – коэффициент, учитывающий вид материала;  $HB$  – твердость обрабатываемой заготовки.

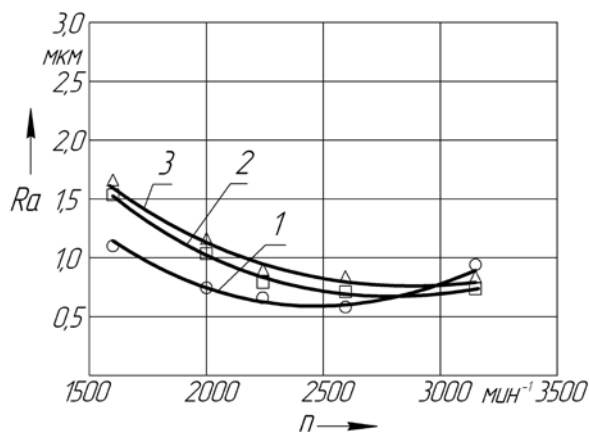
Разработан программный продукт с использованием математического прикладного программного обеспечения, позволяющий на стадии технологической подготовки производства осуществлять прогнозирование шероховатости поверхности после магнитно-динамического раскатывания.

Расхождение расчетных и экспериментальных значений параметров шероховатости упрочненной поверхности составило 8–10 %, что подтверждает адекватность разработанной математической модели процесса магнитно-динамического раскатывания.

**Четвертая глава** посвящена исследованию качественных характеристик поверхностного слоя упрочненных деталей.

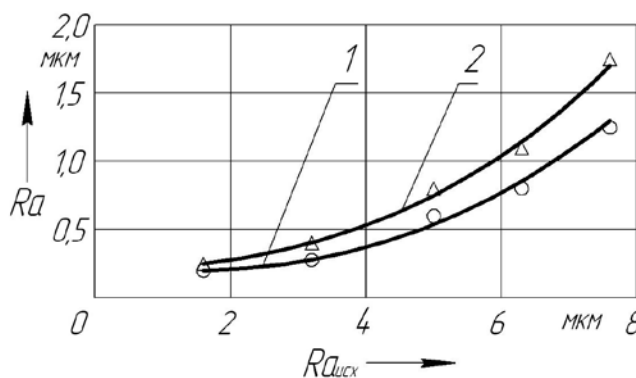
Определены оптимальные частоты вращения инструмента (рисунок 5), при которых обеспечивается минимальное значение шероховатости упрочненной поверхности  $Ra$  0,6–0,8 мкм при подаче инструмента  $S = 50$  мм/мин,  $D_{ш} = 12$  мм:  $n = 2450$  мин<sup>-1</sup> для стали 45 (180–200 НВ);  $n = 2800$  мин<sup>-1</sup> для стали 45 (32–35 HRC);  $n = 3100$  мин<sup>-1</sup>, для стали 45 (42–45 HRC).

Установлено, что МДР поверхности отверстия, полученного после чистового растачивания или зенкерования, позволяет снизить исходную шероховатость в 6,1 раза ( $Ra$  с 7,6 до 1,25 мкм) – для деталей из стали 45 (180–200 НВ) и в 4,4 раза ( $Ra$  с 7,6 до 1,7 мкм) – для деталей из стали 45 (42–45 HRC) (рисунок 6).



1 – сталь 45 (180–200 НВ); 2 – сталь 45 (32–35 HRC); 3 – сталь 45 (42–45 HRC)

**Рисунок 5 – Зависимость шероховатости поверхности от частоты вращения инструмента**

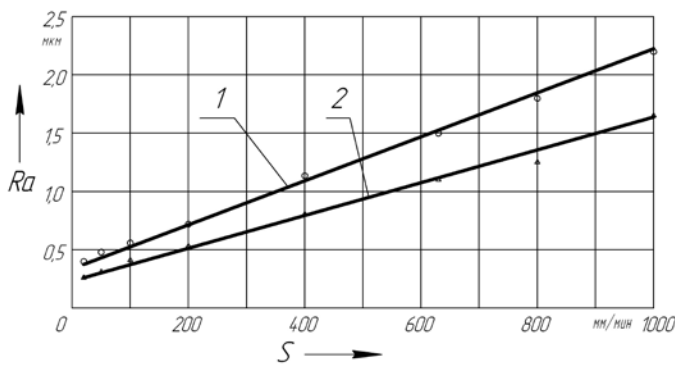


1 – сталь 45 (180–200 НВ), 2 – сталь 45 (42–45 HRC)

**Рисунок 6 – Влияние исходной шероховатости поверхности детали на шероховатость после МДР ( $n = 2240$  мин<sup>-1</sup>,  $S = 50$  мм/мин)**

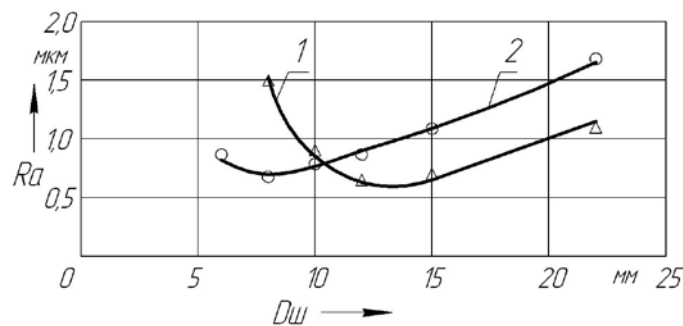
Установлено, что на шероховатость формируемой поверхности влияет величина подачи инструмента (рисунок 7). При упрочнении поверхности с исходной шероховатостью  $Ra$  4,3–4,1 мкм в диапазоне подач инструмента от 20 до 1000 мм/мин обеспечивается снижение шероховатости поверхности  $Ra$  до 2,2–0,3 мкм.

Определены оптимальные диаметры деформирующих шаров раскатника (рисунок 8):  $D_{ш} = 13$  мм – для стали 45 (180–200 НВ);  $D_{ш} = 8$  мм – для стали 45 (42–45 HRC).



1 – обработка односекционным инструментом;  
2 – обработка двухсекционным инструментом

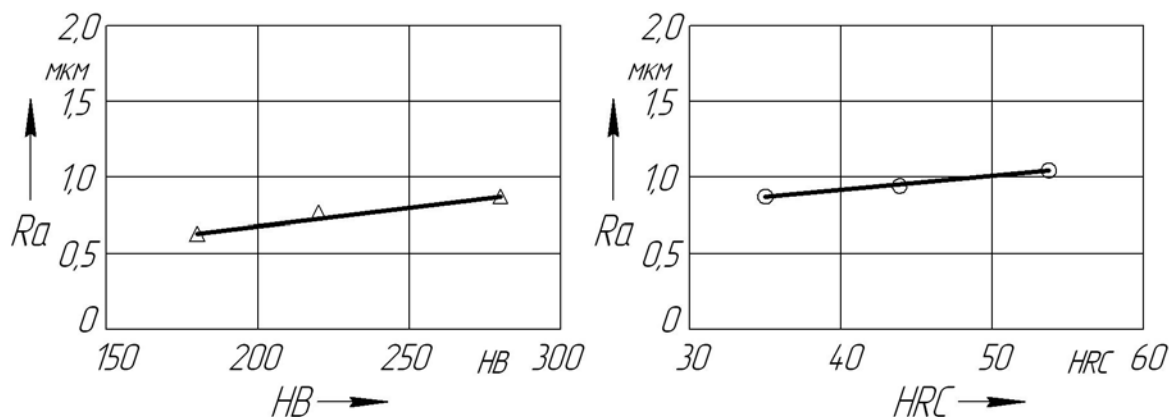
**Рисунок 7 – Зависимость шероховатости обработанной поверхности от подачи инструмента (сталь 45 (180–200 HB),  $n = 2240$  мин<sup>-1</sup>,  $D_{ш} = 12$  мм,  $Ra_{исх} = 3,0–3,3$  мкм)**



1 – сталь 45 (180–200 HB),  $Ra_{исх} = 4,1–4,4$  мкм;  
2 – сталь 45 (42–45 HRC),  $Ra_{исх} = 4,1–4,8$  мкм;

**Рисунок 8 – Влияние диаметра деформирующего шара на шероховатость после магнитно-динамического раскатывания ( $n = 2240$  мин<sup>-1</sup>,  $S = 50$  мм/мин)**

Анализ результатов экспериментальных исследований показал, что метод магнитно-динамического раскатывания позволяет вести высокопроизводительную отделочно-упрочняющую обработку поверхностей деталей твердостью до 50–55 HRC (рисунок 9).



**Рисунок 9 – Зависимость шероховатости поверхности детали от твердости обрабатываемого материала (сталь 45;  $Ra_{исх} = 4,4–4,1$  мкм;  $n=2240$  мин<sup>-1</sup>;  $S=50$  мм/мин;  $D_{ш}=12$  мм)**

Установлено, что магнитно-динамическое раскатывание не меняет исходную точность диаметрального размера деталей из стали 45 (180–200 HB), полученную после чистового растачивания, что свидетельствует об упругой схеме взаимодействия деформирующего шара с упрочняемой поверхностью.

Показано, что при магнитно-динамическом раскатывании изменение размера детали происходит в пределах высоты микронеровностей поверхности и составляет для деталей: из стали 45 (180–200 HB) – 13–15 мкм, а из стали 45 (42–45HRC) – 11–14 мкм, при исходной шероховатости поверхности  $Ra$  3,2 мкм.

Испытания показали, что упрочнение деталей из стали 45 (180–200 НВ) магнитно-динамическим раскатыванием обеспечивает повышение износостойкости поверхности в 2,3 раза, а деталей из стали 45 (42–45 HRC) – в 2,1 раза в сравнении с поверхностью, полученной после растачивания.

Проведенные рентгеноструктурные исследования позволили установить, что в поверхностном слое деталей из стали 45 (42–44 HRC), прошедших магнитно-динамическое упрочнение, формируется наноразмерная субзеренная структура, характеризующаяся скоррелированным расположением дислокаций в виде стенок, образующих границы блоков, ячеек и субзерен. При этом установлено увеличение плотности дислокаций в поверхностном слое на 14,5 % и наличие остаточных напряжений сжатия величиной до 158 МПа.

Определено, что магнитно-динамическое раскатывание обеспечивает упрочнение поверхностного слоя для стали 45 (180–200 НВ) на глубину до 600 мкм и увеличение микротвердости поверхности на 18–25 %; для стали 45 (42–45 HRC) на глубину до 20 мкм и увеличение микротвердости поверхности на 26–31 %.

Выявлено, что период стойкости деформирующих шаров инструмента определяемый допустимой величиной шероховатости их поверхности, зависит от твердости материала упрочняемой детали и составляет при обработке стали 45 (180–200 НВ) – 8,1 ч, стали 45 (42–45 HRC) – 5,2 ч. Деформирующие шары инструмента, шероховатость которых достигла предельно допустимого значения Ra 0,4 мкм, подлежат замене или восстановлению известными методами, например полированием.

**В пятой главе** рассмотрены прогрессивные конструкции инструментов и устройств для упрочнения внутренних цилиндрических поверхностей деталей, позволяющие расширить область использования процесса магнитно-динамического упрочнения в условиях крупносерийного и массового типов производства.

Разработано устройство для магнитно-динамического упрочнения (патент № 15021 РБ от 30.10.2011 г.), содержащее регулируемую магнитную систему, позволяющую изменять характеристики магнитного воздействия на деформирующие шары и обеспечить их непрерывное или ударное взаимодействие с обрабатываемой поверхностью детали. Это расширяет технологические возможности устройства и обеспечивает возможность получения гладкой или рельефной упрочненной поверхности, необходимой для обеспечения высокой контактной жесткости или повышения износостойкости на основе получения маслостойкого рельефа.

Предложен инструмент для магнитно-динамического упрочнения (патент № 10188 РБ от 28.02.2008 г.), отличающийся наличием автономного привода деформирующих шаров, включающего корпус, шпиндель, магнитную систему



с деформирующими шарами и источник вращения магнитной системы, позволяющий осуществлять отделочно-упрочняющую обработку отверстий цилиндров большой длины.

Предложен магнитно-динамический раскатник, отличающийся наличием устройства для намагничивания поверхности детали, обеспечивающий комбинированное энергетическое воздействие на зону обработки магнитным полем и деформирующими шарами (патент № 15364 РБ от 28.02.2012 г.).

С целью интенсификации процесса деформирования и для увеличения глубины упрочнения поверхностного слоя детали предложена двухрядная конструкция магнитно-динамического раскатника, содержащая два ряда шаров, установленных в кольцевых камерах, взаимодействующих между собой и осуществляющих упрочняющую обработку (патент № 15091 РБ от 30.12.2011 г.).

Результаты выполненной работы внедрены в производство на УЧПП «Стройремавто» (г. Могилев) с годовым экономическим эффектом в размере 6,9 млн р. (в ценах 2011 г.) и на ОАО «Минский завод колесных тягачей».

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### **Основные научные результаты диссертации**

1. Разработан способ магнитно-динамического раскатывания внутренней цилиндрической поверхности, при котором упрочнение поверхности осуществляют деформирующими шарами, свободно установленными в кольцевой камере перемещаемого инструмента, отличающийся тем, что рабочее движение деформирующим шарам сообщают вращаемым, периодически действующим магнитным полем с индукцией источников магнитного поля инструмента 0,2–1,2 Тл и частотой воздействия 160–840 Гц, что обеспечивает интенсивное снижение микронеровностей поверхности: в 6,1 раза ( $R_a$  с 7,6 до 1,25 мкм) и в 8 раз ( $R_a$  с 1,6 до 0,2 мкм) для деталей из стали 45 (180–200 НВ); в 4,4 раза ( $R_a$  с 7,6 до 1,7 мкм) и в 6,4 раза ( $R_a$  с 1,6 до 0,25 мкм) для деталей из стали 45 (42–45 HRC) [1-А, 26-А, 28-А, 43-А].

2. Для реализации способа магнитно-динамического раскатывания разработаны конструкции инструментов, имеющие кольцевую камеру со свободно установленными деформирующими шарами, отличающиеся наличием магнитной системы на основе цилиндрических, пластинчатых или кольцевых постоянных магнитов (Nd-Fe-B, Sm-Co, феррит стронция), позволяющей преобразовать энергию магнитного поля инструмента в колебательные движения деформирующих шаров. Получены рекомендации по выбору параметров элементов магнитной системы инструмента: диаметра деформирующих шаров, диаметра обоймы магнитной системы, диаметра и

высоты цилиндрического постоянного магнита, количества постоянных магнитов и деформирующих шаров, обеспечивающих сокращение объема магнитного материала магнитной системы, сокращение времени на проектирование магнитной системы, тем самым снижая себестоимость инструмента [1-А, 15-А, 22-А, 43-А].

3. Разработана математическая модель магнитно-динамического раскатывания, описывающая движение деформирующих шаров, учитывающая влияние на деформирующие шары вращаемого периодически действующего магнитного поля инструмента, позволившая определить траекторию и характеристики движения центра масс деформирующих шаров в зависимости от параметров процесса упрочнения; получить аналитическую зависимость для расчета силы удара деформирующего шара о деталь с учетом уточнения времени взаимодействия деформирующего шара с вогнутой поверхностью заготовки в случае косоугольного удара; прогнозировать величину шероховатости упрочненной поверхности. Представлена аналитическая зависимость для определения силы магнитного взаимодействия деформирующего шара с источником магнитного поля инструмента, учитывающая угловое расположение деформирующего шара по отношению к источнику магнитного поля инструмента, позволившая установить взаимосвязь параметров движения деформирующих шаров с характеристиками магнитного поля инструмента [5-А, 6-А, 9-А, 29-А].

4. На основе анализа результатов экспериментальных исследований установлена взаимосвязь параметров качества обработанной поверхности с режимами процесса магнитно-динамического раскатывания, что позволило:

– оптимизировать параметры упрочняющей обработки при обеспечении минимальной шероховатости поверхности:  $n = 2450 \text{ мин}^{-1}$  – для стали 45 (180–200 НВ),  $n = 2800 \text{ мин}^{-1}$  – для стали 45 (32–35 HRC),  $n = 3100 \text{ мин}^{-1}$  – для стали 45 (42–45 HRC); диаметр деформирующих шаров раскатника  $D_{ш} = 13 \text{ мм}$  – для обработки стали 45 (180–200 НВ);  $D_{ш} = 8 \text{ мм}$  – для обработки стали 45 (42–45 HRC);

– выявить технологические возможности способа магнитно-динамического раскатывания: способ позволяет вести высокопроизводительную упрочняющую обработку поверхности деталей твердостью до 50–55 HRC; при упрочнении поверхности деталей из стали 45 с исходной шероховатостью  $Ra 4,3\text{--}4,1 \text{ мкм}$  в диапазоне подач инструмента от 20 до 1000 мм/мин достигается снижение шероховатости поверхности в пределах  $Ra 2,2\text{--}0,3 \text{ мкм}$ ; обеспечивается повышение износостойкости поверхности детали из стали 45 в 2,1–2,3 раза; выявлено упрочнение поверхностного слоя детали из стали 45 (180–200 НВ) на глубину до 600 мкм и увеличение микротвердости поверхности на 18–30 % [1-А, 3-А, 4-А, 25-А, 27-А].

5. Разработаны прогрессивные конструкции инструментов для магнитно-динамического упрочнения поверхностей деталей, отличающиеся наличием регулируемой магнитной системы, автономного магнитного привода деформирующих шаров, устройства намагничивания поверхностного слоя ферромагнитной детали, позволяющие осуществлять эффективную отделочно – упрочняющую обработку поверхности деталей в условиях крупносерийного и массового типов производства [2-А – 4-А, 31-А, 37-А, 39-А, 42-А].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Результаты выполненной работы внедрены в производство на УЧПП «Стройремавто» (г. Могилев) и на ОАО «Минский завод колесных тягачей» при отделочно-упрочняющей обработке поверхности отверстия соответственно «трубы оси» и «цилиндра», что позволило исключить из технологического процесса операцию шлифования и получить годовой экономический эффект в размере 6,9 млн р. (в ценах 2011 г.).

Результаты работы внедрены в учебный процесс при подготовке студентов Белорусско-Российского университета по специальности 1-36 01 03 «Технологическое оборудование машиностроительного производства».

Для назначения припуска на механическую обработку детали важно учесть, что при магнитно-динамическом раскатывании происходит изменение размера детали в пределах высоты шероховатости исходной поверхности и составляет для деталей из стали 45 (180–200 НВ) 13–15 мкм, из стали 45 (42–45HRC) 11–14 мкм (при исходной шероховатости поверхности Ra 3,2 мкм).

При эксплуатации магнитно-динамических раскатников необходимо учитывать период стойкости деформирующих шаров (12–60 ГОСТ 3722-81 ШХ15 (62–66 HRC) и шероховатость сферической поверхности Ra 0,1 мкм), который зависит от твердости упрочняемой детали и, соответственно, составляет при обработке стали 45 (180–200 НВ) 8,1 ч, стали 45 (42–45 HRC) 5,2 ч.

Результаты исследований рекомендуются к использованию на машиностроительных предприятиях для отделочно-упрочняющей обработки отверстий деталей машин – гильз, цилиндров, втулок и т. д.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

1-А. **Довгалец, А. М.** Классификация инструментов для магнитно-динамического упрочнения / А. М. Довгалец, Д. М. Свирепа, Д. М. Рыжанков // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2008. – № 2. – С. 30–38.

2-А. **Довгалец, А. М.** Двухрядные магнитно-динамические инструменты / А. М. Довгалец, С. А. Сухоцкий, Д. М. Свирепа, Д. М. Рыжанков // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П.О. Сухого. – 2009. – № 2. – С. 12–20.

3-А. **Довгалец, А. М.** Магнитно-динамические инструменты для упрочнения наружных поверхностей вращения / А. М. Довгалец, С. А. Сухоцкий, Д. М. Свирепа, Д. М. Рыжанков // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. – 2009. – № 4. – С. 56–62.

4-А. **Довгалец, А. М.** Инструменты для магнитно-динамического упрочнения поверхностей деталей машин / А. М. Довгалец, С. А. Сухоцкий, Д. М. Свирепа, Д. М. Рыжанков // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. – 2009. – № 4. – С. 94–97.

5-А. **Довгалец, А. М.** Математическое моделирование процесса магнитно-динамического раскатывания / А. М. Довгалец, И. И. Маковецкий, Д. М. Свирепа // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. – 2010. – № 4. – С. 26–30.

6-А. **Довгалец, А. М.** Математическое моделирование магнитно-динамического инструмента для упрочняющей обработки плоских поверхностей / А. М. Довгалец, Н. А. Леванович, С. А. Сухоцкий, Д. М. Свирепа // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2010. – № 4. – С. 55–65.

### Материалы конференций

7-А. **Свирепа, Д.М.** Повышение эффективности упрочнения деталей ППД / Д.М. Свирепа // 38-я студ. науч.-техн. конф. : материалы конф. – Могилёв: МГТУ, 2002. – С. 162.

8-А. **Свирепа, Д.М.** Новые высокопроизводительные инструменты для ППД / Д.М. Свирепа // 39-я студ. науч.-техн. конф. : материалы конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2003. – С. 190.

9-А. **Довгалец, А.М.** Динамическая модель инструмента с магнитоуправляемыми деформирующими элементами / А.М. Довгалец, Д.М. Рыжанков, Д.М. Свирепа // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы науч.-техн. конф., Могилев, 22-23 апр. 2004 г.: в 3 ч. / Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2004. – Ч. 2. – С. 39.

10-А. **Рыжанков, Д.М.** Современные методы упрочнения деталей магнитоуправляемыми деформирующими элементами / Д.М. Рыжанков, Д.М. Свирепа // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы респ. науч.-техн. конф., Могилев, 29 янв. 2004 г. / Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2004. – С. 63.

11-А. **Рыжанков, Д.М.** Устойчивость процесса упрочнения деталей магнитоуправляемыми деформирующими элементами / Д.М. Рыжанков, Д.М. Свирепа // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности:

материалы науч.-техн. конф. асп., магистр. и студ., Могилев, 27 янв. 2005 г. / Беларус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2005. – С. 67.

12-А. **Рыжанков, Д.М.** Упрочнение деталей магнитоуправляемыми деформирующими элементами / Д.М. Рыжанков, Д.М. Свирепа // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы науч.-техн. конф. асп., магистр. и студ., Могилев, 27 янв. 2005 г. / Беларус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2005. – С. 69.

13-А. **Довгалец, А.М.** Оптимизация параметров инструментов с магнитоуправляемыми деформирующими элементами / А.М. Довгалец, Д.М. Свирепа, Д.М. Рыжанков // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы науч.-техн. конф. асп., магистр. и студ., Могилев, 21-22 апр. 2005 г.: в 2 ч. / Беларус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2005. – Ч. 1. – С. 42.

14-А. **Рыжанков, Д.М.** Исследование устойчивости работы инструмента с магнитоуправляемыми деформирующими элементами / Д.М. Рыжанков, Д.М. Свирепа // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы респ. науч.-техн. конф. асп., магистр. и студ., Могилев, 26 янв. 2006 г. / Беларус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2006. – С. 71.

15-А. **Свирепа, Д.М.** Модульный принцип конструирования инструментов с магнитоуправляемыми деформирующими элементами / Д.М. Свирепа, Д.М. Рыжанков // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы респ. науч.-техн. конф. асп., магистр. и студ., Могилев, 26 янв. 2006 г. / Беларус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2006. – С. 73.

16-А. **Рыжанков, Д.М.** Инструмент с магнитоуправляемыми деформирующими элементами / Д.М. Рыжанков, Д.М. Свирепа // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 20-21 апр. 2006 г.: в 3 ч. / Беларус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2006. – Ч.1. – С. 97.

17-А. **Сухоцкий, С.А.** Упрочняющая обработка плоских поверхностей магнитоуправляемыми деформирующими элементами / С.А. Сухоцкий, Д.М. Рыжанков, Д.М. Свирепа // Развитие приграничных регионов Беларуси и России на современном этапе: проблемы и перспективы: материалы науч.-практ. конф. асп., магистр. и студ. приграничных областей России и Беларуси, Могилев, 12-13 окт. 2006 г. / Беларус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2007. – С. 45.

18-А. **Сухоцкий, С.А.** Магнитно-динамические инструменты для упрочняющей обработки плоских поверхностей / С.А. Сухоцкий, Д.М. Рыжанков, Д.М. Свирепа // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы междунар. науч.-техн. конф. мол. ученых, Могилев, 24-25 янв. 2007 г. / Беларус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2007. – С. 38.

19-А. **Довгалев, А.М.** Магнитно-динамическое упрочнение плоских поверхностей / А.М. Довгалев, С.А. Сухоцкий, Д.М. Свирепа // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 19-20 апр. 2007 г.: в 3 ч. / Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2007. – Ч. 1. – С. 55.*

20-А. **Рыжанков, Д.М.** Эффект магнитно-динамического упрочнения / Д.М. Рыжанков, А.М. Довгалев, Д.М. Свирепа // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 19-20 апр. 2007 г.: в 3 ч. / Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2007. – Ч. 1. – С. 93.*

21-А. **Свирепа, Д.М.** Магнитно-динамическое упрочнение валов / Д.М. Свирепа, А.М. Довгалев, Д.М. Рыжанков // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 19-20 апр. 2007 г.: в 3 ч. / Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2007. – Ч. 1. – С. 95.*

22-А. **Свирепа, Д.М.** Интенсификация процесса упрочнения магнитно-динамическими инструментами / Д.М. Свирепа, Д.М. Рыжанков, С.А. Сухоцкий // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 19-20 апр. 2007 г.: в 3 ч. / Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2007. – Ч. 1. – С. 96.*

23-А. **Рыжанков, Д.М.** Повышение эффективности раскатывания втулок методом магнитно-динамического упрочнения / Д.М. Рыжанков, Д.М. Свирепа, А.М. Довгалев // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 17-18 апр. 2008 г.: в 3 ч. / Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2008. – Ч. 1. – С. 61.*

24-А. **Свирепа, Д.М.** Исследование шумовых характеристик процесса магнитно-динамического упрочнения / Д.М. Свирепа, Д.М. Рыжанков, А.М. Довгалев // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 16-17 апр. 2009 г.: в 3 ч. / Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2009. – Ч. 1. – С. 102.*

25-А. **Свирепа, Д.М.** Рентгеноструктурные исследования деталей, прошедших магнитно-динамическое упрочнение / Д.М. Свирепа, Д.М. Рыжанков // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 22-23 апр. 2010 г.: в 3 ч. / Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2010. – Ч. 1. – С. 243–244.*

26-А. **Свирепа, Д.М.** Метод магнитно-динамического раскатывания деталей технических систем / Д.М. Свирепа, А.М. Довгалев // *Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы междунар. науч.-техн. конф. мол. ученых, Могилев, 17-18 нояб. 2011 г. / Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2011. – С. 3–7.*

27-А. **Свирепа, Д.М.** Инструменты для магнитно-динамического упрочнения / Д.М. Свирепа // *Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы междунар. науч.-техн. конф. мол. ученых, 17-18*

нояб. 2011 г. / Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2011. – С. 43.

28-А. **Свирепа, Д.М.** Магнитно-динамическое раскатывание / Д.М. Свирепа, А.М. Довгалев // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении : материалы междунар. науч.-практ. конф. / БНТУ; редкол. : Б.М. Хрусталева [и др.] – Минск, 2012. – С.155–156.

29-А. **Довгалев, А.М.** Взаимодействие деформирующего шара с источником магнитного поля динамического раскатника / А.М. Довгалев, В.В. Глущенко, Д.М. Свирепа // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 19-20 апр. 2012 г.: в 2 ч. / Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2012. – Ч. 1. – С. 33–34.

#### **Патенты Республики Беларусь и поданные заявки на патенты**

30-А. Устройство для отделочно-упрочняющей обработки: пат. 10065 Респ. Беларусь, МПК В 24 В 39/02 / А.М. Довгалев, Д.М. Свирепа, Д.М. Рыжанков; заявитель Белорус.-Рос. ун-т. – № а 20050604; заявл. 16.06.05; опубл. 30.12.07 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 6. – С. 72.

31-А. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки: пат. 10188 Респ. Беларусь, МПК В 24 В 39/00 / А.М. Довгалев, Д.М. Свирепа, Д.М. Рыжанков; заявитель Белорус.-Рос. ун-т. – № а 20050605; заявл. 16.06.05; опубл. 28.02.08 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 1. – С. 78.

32-А. Раскатник с магнитоуправляемыми деформирующими элементами: пат. 11531 Респ. Беларусь, МПК В 24 В 39/00 / А.М. Довгалев, Д.М. Свирепа, Д.М. Рыжанков; заявитель Белорус.-Рос. ун-т. – № а 20060637; заявл. 27.06.06; опубл. 28.02.09 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 1. – С. 66–67.

33-А. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки: пат. 11536 Респ. Беларусь, МПК В 24 В 39/00 / А.М. Довгалев, Д.М. Рыжанков, Д.М. Свирепа; заявитель Белорус.-Рос. ун-т. – № а 20060760; заявл. 20.07.06; опубл. 28.02.09 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 1. – С. 67.

34-А. Инструмент для упрочняющей обработки плоских поверхностей: пат. 14014 Респ. Беларусь, МПК В 24 В 39/00 / А.М. Довгалев, С.А. Сухоцкий, Д.М. Свирепа, Д.М. Рыжанков; заявитель Белорус.-Рос. ун-т. – № а 20090579; заявл. 20.04.09; опубл. 28.02.11 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 1. – С. 90.

35-А. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки плоских поверхностей: пат. 14287 Респ. Беларусь, МПК В 24 В 39/00 / А.М. Довгалев, С.А. Сухоцкий, Д.М. Свирепа, Д.М. Рыжанков; заявитель Белорус.-Рос. ун-т. – № а 20081204; заявл. 23.09.08; опубл. 30.04.11 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 2. – С. 75–76.

36-А. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки плоской поверхности: пат. 14651 Респ. Беларусь, МПК В 24 В 39/02 / А.М. Довгалев,

С.А. Сухоцкий, Д.М. Свирепа, Д.М. Рыжанков; заявитель Белорус.-Рос. ун-т. – № а 20081196; заявл.22.09.08; опубл. 30.08.11 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 4. – С. 86.

37-А. Устройство для отделочно-упрочняющей обработки: пат. 15021 Респ. Беларусь, МПК В 24 В 39/02 / А.М. Довгалев, Д.М. Свирепа, Д.М. Рыжанков, С.А. Сухоцкий; заявитель Белорус.-Рос. ун-т. – № а 20091610; заявл.13.11.09; опубл.30.10.11 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 5. – С. 94.

38-А. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки: пат. 15022 Респ. Беларусь, МПК В 24 В 39/02 / А.М. Довгалев, С.А. Сухоцкий, Д.М. Рыжанков, Д.М. Свирепа; заявитель Белорус.-Рос. ун-т. – № а 20091853; заявл.23.12.09; опубл.30.10.11 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 5. – С. 94–95.

39-А. Устройство для поверхностного пластического деформирования: пат. 15091 Респ. Беларусь, МПК В 24 В 39/02 / А.М. Довгалев, С.А. Сухоцкий, Д.М. Свирепа, Д.М. Рыжанков, С.Н. Близнюк; заявитель Белорус.-Рос. ун-т. – № а 20090950; заявл. 26.06.09; опубл. 30.12.11 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 6. – С. 87.

40-А. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки плоских поверхностей: пат. 15262 Респ. Беларусь, МПК В 24 В 39/06 / А.М. Довгалев, С.А. Сухоцкий, Д.М. Свирепа, Д.М. Рыжанков; заявитель Белорус.-Рос. ун-т. – № а 20091368; заявл. 25.09.09; опубл. 30.12.11 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 6. – С. 87–88.

41-А. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки плоских поверхностей: пат. 15263 Респ. Беларусь, МПК В 24 В 39/06 / А.М. Довгалев, С.А. Сухоцкий, Д.М. Свирепа, Д.М. Рыжанков; заявитель Белорус.-Рос. ун-т. – № а 20091407; заявл. 02.10.09; опубл. 30.12.11 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 6. – С. 88.

42-А. Упрочняющий инструмент: пат. 15364 Респ. Беларусь, МПК В 24 В 39/02 / А.М. Довгалев, Д.М. Свирепа, Д.М. Рыжанков, С.А. Сухоцкий; заявитель Белорус.-Рос. ун-т. – № а 20091852; заявл. 23.12.09; опубл. 28.02.12 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 1. – С. 81.

43-А. Способ магнитно-динамического упрочнения: заявка на патент № 20120052, МПК В 24В 39/00 / А.М. Довгалев, Д.М. Свирепа; заявитель Белорус.-Рос. ун-т. – заявл.16.01.2012.

44-А. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки: заявка на патент № 20120542, МПК В 24В 39/00 / А.М. Довгалев, Д.М. Свирепа, С.А. Сухоцкий; заявитель Белорус.-Рос. ун-т. – заявл.04.04.2012.

45-А. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки: заявка на патент № 20120560, МПК В 24В 39/00 / А.М. Довгалев, Д.М. Свирепа, С.А. Сухоцкий; заявитель Белорус.-Рос. ун-т. – заявл.05.04.2012.



## РЭЗЮМЭ

Свірэпа Дзмітрый Міхайлавіч

### Тэхналагічнае забеспячэнне якасці ўнутранай цыліндрычнай паверхні дэталю магнітна-дынамічным раскатваннем

**Ключавыя словы:** магнітна-дынамічнае раскатванне (МДР), паверхневае пластычнае дэфармаванне, магнітная сістэма, дэфармуючыя шары, умацоўваючая апрацоўка, шурпатасць паверхні, глыбіня ўмацавання, стойкасць дэфармуючых шароў.

**Мэта працы:** павышэнне эфектыўнасці аддзелачна-ўмацоўваючай апрацоўкі ўнутранай цыліндрычнай паверхні дэталю машын з выкарыстаннем магнітна-дынамічнага раскатвання.

**Метады даследавання:** у працы прымяняліся тэарэтычныя і эксперыментальныя метады даследавання. Тэарэтычныя даследаванні базіраваліся на законах тэарэтычнай механікі, дыферэнцыяльнага і інтэгральнага вылічэнняў і электрадынамікі, тэхналогіі машынабудавання і матэрыялазнаўства. Эксперыментальныя даследаванні ажыццяўляліся з выкарыстаннем сучаснай вымяральной і рэгіструючай апаратуры, распрацаваных устройстваў і інструментаў. Апрацоўку эксперыментальных дадзеных ажыццяўлялі пры дапамозе матэматычнага апарата і метадаў статыстыкі.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна.** Распрацаваны спосаб магнітна-дынамічнага раскатвання і спраектаваны інструменты для яго ажыццяўлення. Выканана матэматычнае мадэляванне працэсу МДР, якое дазволіла ўстанавіць узаемасувязь параметраў працэсу ўмацавання і кінестатычных характарыстык дэфармуючых шароў інструмента. Тэарэтычна даказана і эксперыментальна пацверджана магчымасць дынамічнага ўмацавання паверхні дэталі дэфармуючымі шарамі пад уздзеяннем перыядычнага вярчэння магнітнага поля. Атрыманы залежнасці для вызначэння сілы магнітнага ўзаемадзеяння дэфармуючага шара і крыніцы магнітнага поля. Прапанавана формула для разліку шурпатасці фарміруемай паверхні пры магнітна-дынамічным раскатванні. На аснове тэарэтычных даследаванняў распрацаваны метады магнітна-дынамічнага раскатвання. Устаноўлена ўзаемасувязь шурпатасці ўмацаванай паверхні і параметраў працэсу ўмацавання і выяўлены рацыянальныя рэжымы ўмацавання. Вызначаны тэхналагічныя магчымасці працэсу МДР.

**Галіна прымянення:** аддзелачна-ўмацоўваючая апрацоўка паверхні адтулін дэталю машын.

## РЕЗЮМЕ

Свирипа Дмитрий Михайлович

### **Технологическое обеспечение качества внутренней цилиндрической поверхности деталей магнитно-динамическим раскатыванием**

**Ключевые слова:** магнитно-динамическое раскатывание (МДР), поверхностное пластическое деформирование, магнитная система, деформирующие шары, упрочняющая обработка, шероховатость поверхности, глубина упрочнения, стойкость деформирующих шаров.

**Цель работы:** повышение эффективности отделочно-упрочняющей обработки внутренней цилиндрической поверхности деталей машин с использованием магнитно-динамического раскатывания.

**Методы исследования:** в работе применялись теоретические и экспериментальные методы исследования. Теоретические исследования базировались на законах теоретической механики, дифференциального и интегрального исчисления и электродинамики, технологии машиностроения и материаловедения. Экспериментальные исследования осуществлялись с использованием современной измерительной и регистрирующей аппаратуры, разработанных устройств и инструментов. Обработку экспериментальных данных осуществляли с помощью математического аппарата и методов статистики.

**Полученные результаты и их новизна.** Разработан способ магнитно-динамического раскатывания и спроектированы инструменты для его осуществления. Выполнено математическое моделирование процесса МДР, которое позволило установить взаимосвязь параметров процесса упрочнения и кинетостатических характеристик деформирующих шаров инструмента. Теоретически доказана и экспериментально подтверждена возможность динамического упрочнения поверхности детали деформирующими шарами под действием периодического вращаемого магнитного поля. Получены зависимости для определения силы магнитного взаимодействия деформирующего шара и источника магнитного поля. Предложена формула для расчета шероховатости формируемой поверхности при магнитно-динамическом раскатывании. Установлена взаимосвязь шероховатости упрочненной поверхности и параметров процесса упрочнения и выявлены рациональные режимы упрочнения. Определены технологические возможности процесса МДР.

**Область применения:** отделочно-упрочняющая обработка поверхности отверстия деталей машин.

## SUMMARY

Svirepa Dmitry Mikhailovich

### **Technological quality improvement of the inner cylindrical surface of workpieces by magnetic dynamic rolling**

**Key words:** magnetic dynamic rolling (MDR), surface plastic deformation, magnetic system, deforming balls, strengthening treatment, surface roughness, depth of strengthening, deforming balls life.

**Objective:** enhancement of efficiency of finishing and strengthening treatment of inner cylindrical surface machine elements by magnetic dynamic rolling.

**Methods of research:** theoretical and experimental methods are used in research work. Theoretical research is based on the laws of theoretical mechanics, differential and integral calculus and electrodynamics, mechanical engineering and material science. Experimental research is carried out with the use of modern measuring and recording equipment, developed devices and tools. The experimental data processing is made with the help of the mathematical apparatus and statistical methods.

**Results obtained and their novelty:** the method of magnetic dynamic rolling is developed and tools for its realization are designed. Mathematical simulation of MDR process is made, which allows determining interrelation of strengthening parameters and the kinetostatics features of tool deforming balls. The possibility of dynamic strengthening of the workpiece surface by deforming balls under the action of periodic rotating magnetic field is proved theoretically and is confirmed experimentally. The dependences for determining the force of magnetic interaction of a deforming ball with a magnetic field source are obtained. The formula for calculation of roughness of the surface being formed by means of magnetic dynamic rolling is given. The interrelation of roughness of the strengthened surface with strengthening parameters is determined, and rational strengthening schedules are found. Technological capabilities of MDR process are determined.

**Scope:** finishing and strengthening treatment of the hole surface of machine elements.

**СВИРЕПА**  
**Дмитрий Михайлович**

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ВНУТРЕННЕЙ  
ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАГНИТНО-  
ДИНАМИЧЕСКИМ РАСКАТЫВАНИЕМ**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.02.08 – «Технология машиностроения»

Подписано в печать 22.05.2013. Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Печать трафаретная. Усл.-печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,7. Тираж 110 экз. Заказ № 359.

Издатель и полиграфическое исполнение  
Государственное учреждение высшего профессионального образования  
«Белорусско-Российский университет»  
ЛИ № 02330/0548519 от 16.06.2009.  
пр. Мира, 43, 212000, Могилев.