

На правах рукописи



Ткаченко Артём Николаевич

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ОБРАБОТКИ МЕДНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ  
КОМБИНИРОВАННЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

Специальности: 05.02.08 – Технология машиностроения

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Орёл – 2012

Работа выполнена на кафедре «Автоматизированные станочные и инструментальные системы» Технологического института им. Н. Н. Поликарпова ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК».

Научный руководитель: заслуженный деятель науки РФ,  
доктор технических наук, профессор  
Степанов Юрий Сергеевич;

Официальные оппоненты: Фёдоров Владимир Павлович,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВПО «Брянский государственный  
технический университет»,  
профессор кафедры «Технология машиностроения»

Силантьев Сергей Александрович,  
кандидат технических наук, доцент,  
Муромский институт  
ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный  
университет им. Александра Григорьевича и  
Николая Григорьевича Столетовых»,  
доцент кафедры «Автоматизированное проектирование  
машин и технологических процессов»

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Тульский государственный  
университет»

Защита диссертации состоится «21» декабря 2012 г. в 15<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.182.06 при ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК» по адресу: 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29, ауд. 212

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК».

Автореферат разослан «20» ноября 2012 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета



Ю. В. Василенко

**Актуальность работы.** Известно, что технология механической обработки во многом определяет эксплуатационные показатели деталей машин и механизмов, в том числе и мощных преобразователей тока, выпускаемых на ряде предприятий России, Украины, Белоруссии, Китая и т.д., например ЗАО «Протон-Электротекс» (г. Орёл), ЗАО «Электротекс» (г. Орёл), ОАО «Электровыпрямитель» (г. Саранск), ООО «Элемент-Преобразователь» (Украина, г. Запорожье) и др.

Диоды и тиристоры большой мощности нашли широкое применение во многих отраслях народного хозяйства: в железнодорожном и городском транспорте, в авиа-, станко- и судостроении, электроэнергетике, электрометаллургии, электрохимии и других отраслях экономики. Развитие этих отраслей народного хозяйства у нас в стране и за рубежом требуют от производителей указанной продукции постоянного увеличения производительности обработки таких изделий в связи с ростом масштаба производства.

При производстве плоскостных диодов и тиристоров большой мощности ответственными, сложными и трудоемкими операциями технологического процесса являются операции, связанные с получением плоских поверхностей анода и «Основания» из меди, прилегающих непосредственно к полупроводниковому элементу. Из-за высоких требований по шероховатости ( $Ra \leq 0,63$  мкм), плоскостности (не более 0,01 мм) и параллельности (не более 0,05 мм), предъявляемых к качеству плоской торцевой поверхности (ПТП) электротехнических деталей из меди (ЭДМ), в производстве используются трудоёмкие и малопроизводительные технологии обработки (точение и шлифование).

Учитывая крупносерийный характер производства, постоянный рост серии и повышение требований к качеству изготавливаемой продукции использование в производстве трудоёмких и малопроизводительных технологий обработки нецелесообразно. Поэтому применение комбинированного способа обработки, сочетающего процесс резания и поверхностное пластическое деформирование, обеспечивающего повышение эффективности обработки базовых ПТП ЭДМ, изучение закономерностей формирования микрорельефа при механической обработке и пластическом деформировании медной поверхности является актуальной задачей.

**Цель работы:** повышение производительности и качества обработки плоской торцевой поверхности электротехнических деталей из меди путём применения комбинированных инструментов.

Для достижения указанной цели в работе были поставлены следующие **задачи**:

- выбрать наиболее эффективные направления совершенствования технологии с точки зрения повышения производительности и формирования наилучших параметров поверхностного слоя при анализе методов обработки ПТП ЭДМ;
- разработать конструкции комбинированных инструментов и приспособлений для фрезерной и токарной обработки ПТП ЭДМ и определить их основные конструктивные и технологические параметры, на основе которых получить зависимости для рациональной настройки конструкций, связывающие конструктивные параметры с параметрами процессов обработки при точении или фрезеровании и последующем алмазном выглаживании;
- провести теоретическое исследование влияния прерывистого процесса алмазного выглаживания ПТП ЭДМ на качество поверхностного слоя;

- провести экспериментальные исследования влияния технологических факторов при прерывистой обработке комбинированным инструментом на качество ПТП ЭДМ;
- разработать научно-обоснованные конструкторско-технологические рекомендации по практическому применению комбинированного способа для получения наиболее рационального качества и производительности обработки ПТП ЭДМ.

**Объект исследования:** процесс алмазного выглаживания при прерывистой обработке торцовых поверхностей ЭДМ комбинированным инструментом.

**Предмет исследования:** производительность и качество обработки ПТП ЭДМ.

**Методика исследований.** Теоретические исследования базируются на теориях отделочно-упрочняющей обработки материалов, геометрического анализа, инженерии поверхности, механических колебаний и дифференциального исчисления.

Использованы методы многофакторного планирования экспериментов.

Анализ результатов экспериментальных исследований выполнен с использованием методов математической статистики.

**Научная новизна:**

- уточнена математическая модель А. Г. Сулова применительно к определению шероховатости при комбинированном способе обработки плоских торцовых поверхностей электротехнических деталей из меди. При расчёте второй составляющей  $h_2$  учтено изменение сил, обусловленное неравномерностью твёрдости заготовки на различных участках обрабатываемой поверхности при алмазном выглаживании и амплитудой колебаний вершины резца относительно обрабатываемой поверхности в результате изменения толщины срезаемого слоя;

- установлено преимущественное влияние на качество поверхностного слоя длины фазы внедрения инструмента в заготовку при прерывистом алмазном выглаживании плоских торцовых поверхностей, уточнена формула В. М. Браславского для определения длины фазы внедрения за счёт введения коэффициента  $m$  и определения диапазона его возможных значений. Установлено, что при предварительном заданном натяге алмазного выглаживателя  $h_3 = 0,01 \dots 0,06$  мм и радиусе скругления вершины выглаживателя  $R_{\text{выг}} = 1,5$  мм коэффициент длины фазы внедрения  $m$  изменится в диапазоне от 8,2 до 11,5, а для  $R_{\text{выг}} = 3$  мм – от 5,1 до 7,35.

**Автор защищает:**

- комбинированный способ, сочетающий процесс резания и поверхностно-пластическое деформирование для обработки торцовых поверхностей ЭДМ;

- зависимости для рациональной настройки конструкций комбинированных инструментов;

- математические модели определения шероховатости ПТП ЭДМ, учитывающие взаимное влияние неравномерной твёрдости заготовки на различных участках обрабатываемой поверхности при алмазном выглаживании и амплитуды колебаний вершины резца относительно обрабатываемой поверхности при его прохождении по выступу или впадине исходной шероховатости;

- результаты теоретических и экспериментальных исследований, эмпирические зависимости, устанавливающие взаимосвязь параметров прерывистого процесса резания и алмазного выглаживания на качество обработанной поверхности;

- конструкторско-технологические рекомендации по практическому применению комбинированного способа обработки ПТП ЭДМ.

### **Практическая ценность:**

- разработан комбинированный способ, сочетающий процесс резания и поверхностно-пластическое деформирование для обработки торцовых поверхностей ЭДМ;
- разработаны конструкции комбинированных инструментов и приспособлений для повышения производительности и качества обработки резанием и последующего алмазного выглаживания ПТП ЭДМ. Оригинальность конструкций подтверждена патентами РФ на изобретения № 2338631 от 20.11.2008, № 2350435 и № 2350458 от 27.03.09;
- обеспечено снижение машинного времени на обработку одной детали за счёт: совмещения операции точения или фрезерования с алмазным выглаживанием в одну операцию за один проход; применения специальной оснастки; рациональной настройки конструкции комбинированного инструмента и приспособления;
- разработаны научно обоснованные технологические рекомендации по практическому применению комбинированного инструмента.

**Реализация и внедрение результатов работы.** Были разработаны и приняты к внедрению на ЗАО «Протон-Электротекс» (г. Орел):

- комбинированный инструмент и приспособление для фрезерной обработки и последующего алмазного выглаживания ПТП ЭДМ (экономический эффект, равный 74829,85 руб.);
- комбинированный инструмент и приспособление для токарной обработки и последующего алмазного выглаживания ПТП ЭДМ с продольным (экономический эффект – 249800 руб.) или поперечным расположением обрабатываемых элементов (экономический эффект – 263745,49 руб.).

**Апробация работы.** Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях, конкурсах и выставках: 1-ой студенческой региональной научно-технической конференции «Актуальные проблемы техники и технологии машиностроительного производства» (г. Орёл, 2008 г.); Всероссийской выставке НТТМ-2009 (г. Москва, 2009 г.; получен диплом ВВЦ за проект); конкурс «Молодёжь и наука 21 века» (г. Орёл, 2011 г.); XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии» - «Технология – 2012»; ежегодных научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава Государственного университета – УНПК.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ, в том числе 8 работ в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ для публикации материалов диссертационных исследований, и получены 3 патента РФ на изобретения.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных результатов и выводов по работе, списка литературы из 111 наименований и приложения. Работа содержит 200 страниц, в том числе 168 основного текста, 53 рисунка, 12 таблиц, а так же приложений на 32 страницах.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы исследования, определены цель, задачи, объект, предмет и методы исследования, раскрыта научная новизна и практическая значимость работы.

**В первой главе** представлены результаты научно-технического обзора, анализа научных работ, Internet-источников и патентного поиска по исследованию известных видов обработки, при которых возможно производить обработку ПТП ЭДМ, используемых как базовые поверхности для контакта с полупроводниковым элементом.

Для выбора наиболее перспективных методов обработки с точки зрения формирования наилучших параметров поверхностного слоя была разработана классификация методов обработки плоских торцовых поверхностей деталей из меди. Из анализа которой установлено, что шлифование, доводку и полирование не целесообразно применять для финишной обработки такого материала, как медь, из-за низкой производительности процесса, быстрого засаливания шлифовального круга, что требует частой его правки или замены, низкой стойкости абразивного инструмента в связи с высокой вязкостью меди, неоднородности свойств шлифованной поверхности, высокой вероятности прижогов и внедрения (шаржирования) абразива в обрабатываемую поверхность.

Использование для обработки ПТП обкатников, рабочий элемент которого изготавливают из стали, не рекомендуется применять для обработки меди, так как в процессе обработки в результате адгезионного взаимодействия может наблюдаться образование тонкой пленки налета обрабатываемого материала на рабочей поверхности инструмента, что приводит к увеличению силы трения и резкому ухудшению шероховатости обработанной поверхности.

Для устранения адгезионного взаимодействия инструмента с заготовкой, рекомендуется применять алмазное выглаживание.

Для обеспечения большой степени сглаживания при выглаживании рекомендуется обеспечивать поверхность с остrokонечным профилем микронеровностей, получаемых при лезвийной обработке, поэтому перед финишной обработкой рекомендуется применять операции точения или фрезерования.

Установлено, что алмазный выглаживающий инструмент, прижатый к обрабатываемой поверхности пружиной, копирует макронеровности поверхности, а следовательно не исправляет погрешности геометрической формы и волнистость. Для устранения этих недостатков в качестве финишной операции целесообразно использовать алмазное выглаживание с жёстко закреплённым инструментом, в связи с малой высотой микронеровностей, с улучшением геометрической формы и уменьшением волнистости, лучшей микро топографией, более равномерным распределением неровностей по высоте, большими радиусами скругления вершин, и более высокой опорной площадью рабочей поверхности.

Установлено, что при выглаживании с жёстким закреплением инструмента требуется высокая точность установки детали, поэтому применение данного инструмента целесообразно лишь в случае обработки за одну установку с предшествующей операцией, помещая выглаживающий инструмент сразу за резцом, что решается при использовании комбинированных инструментов.

Для реализации комбинированных инструментов был предложен способ и направления совершенствования технологии обработки ПТП ЭДМ, сочетающие обработку резанием и пластическим деформированием, которые позволяют повысить производительность обработки ПТП за счёт отказа от процесса шлифования и совмещения финишной операции (выглаживания) с предварительной обработкой (точением, фрезерованием).

Установлено, что из-за применения специальных многоместных установочно-зажимных приспособлений при обработке ПТП деталей из меди наблюдается процесс прерывистого резания и алмазного выглаживания. Прерывистость обрабатываемых поверхностей является неблагоприятным фактором, поскольку при входе и выходе инструмента возникают вибрации комбинированного инструмента, обрабатываемой детали и узлов станка, которые являются причиной снижения качества поверхности обрабатываемых деталей. В связи с чем встаёт вопрос об изучении влияния прерывистого процесса резания и алмазного выглаживания ПТП ЭДМ на качество поверхностного слоя.

**Во второй главе** для решения задач диссертационного исследования проанализированы и предложены комбинированные способы, сочетающие обработку резанием и пластическим деформированием с применением комбинированного режущего инструмента и технологической оснастки:

- 1) предварительная обработка производится фрезерованием, финишная операция – алмазным выглаживанием жёстко закреплённым инструментом;
- 2) предварительная обработка выполняется точением, финишная – алмазным выглаживанием жёстко закреплённым инструментом.

Известно, что фрезерование является одним из наиболее производительных процессов резания, поэтому из многих возможных вариантов обработки торцевой поверхности для предварительной обработки можно рекомендовать – фрезерование, а для финишной – алмазное выглаживание с жёстко закреплённым инструментом. Для реализации данного способа обработки разработана оригинальная конструкция комбинированного инструмента (рис. 1), подтверждённая патентом РФ № 2338631.

Для обеспечения высокой производительности труда при минимальных затратах на изготовление, была разработана оригинальная конструкция многоместного установочно-зажимного приспособления (рис. 2), подтверждённая патентом РФ № 2350458.

В ходе определения основных конструктивных и назначаемых технологических параметров комбинированного инструмента и приспособления для обработки ПТП были предложены зависимости (1) и (2) для рациональной настройки конструкции комбинированного инструмента, связывающие конструктивные параметры инструмента, технологической оснастки и заготовки с технологическими режимами обработки при фрезеровании и последующем алмазном выглаживании.

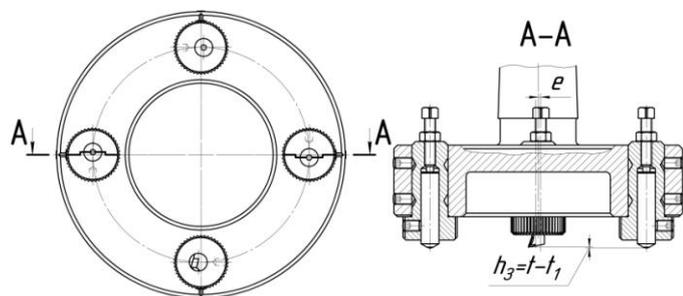


Рис. 1. Комбинированный инструмент для обработки ПТП ЭДМ

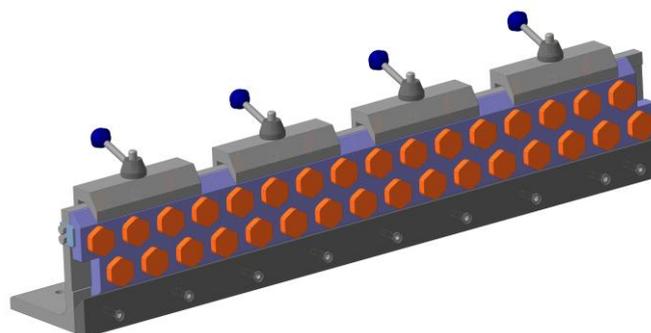


Рис. 2. Приспособление для обработки ПТП электротехнических деталей «Основание»

$$R_{\text{выг max}} = \left( \frac{D_{\text{заг}}}{2} \cdot [(Z-1) \cdot 1,5 \cdot \sin 60^\circ + 1] + \Delta_{\Phi} \right) + n \cdot S_{\text{выг}}, \quad (1)$$

$$R_{\text{рез}} = \left( \left[ \left( \frac{D_{\text{заг}}}{2} \cdot [(Z-1) \cdot 1,5 \cdot \sin 60^\circ + 1] + \Delta_{\Phi} \right) + n \cdot S_{\text{выг}} \right] + \left[ \sqrt{R_{\text{выг}}^2 - (R_{\text{выг}} - t)^2} + \Delta \right] - \left[ k^* + \sqrt{R_{\text{рез}}^2 - (R_{\text{рез}} - t_1)^2} \right] \right). \quad (2)$$

где  $R_{\text{выг max}}$  – максимальный радиус расположения выглаживателей в корпусе комбинированного инструмента, мм;  $R_{\text{рез}}$  – радиус расположения резца, относительно центра вращения комбинированного инструмента, мм;  $D_{\text{заг}}$  – максимальный диаметр размера заготовки, мм;  $Z$  – количество рядов заготовок в приспособлении;  $\Delta_{\Phi}$  – боковой вылет комбинированного инструмента при обработке, мм;  $n$  – количество алмазных выглаживателей;  $S_{\text{выг}}$  – подача, назначаемая при алмазном выглаживании, мм/об;  $R_{\text{выг}}$  – радиус скругления вершины выглаживателя, мм;  $t$  – глубина алмазного выглаживания относительно поверхности заготовки, мм;  $\Delta$  – минимальный зазор между радиусным участком алмазного выглаживателя и краем необработанной поверхности, образованной в процессе резания главной режущей кромкой резца, мм;  $k^*$  – расстояние от оси резца до вершины режущей кромки (определяется из геометрии резца), мм;  $t_1$  – глубина фрезерования относительно поверхности заготовки, мм.

Для реализации комбинированного способа на токарном станке, рассмотрены две конструкции комбинированного инструмента с многоместным установочно-зажимным приспособлением. Одна конструкция с продольным расположением (рис. 3, а), а другая с поперечным расположением резца и выглаживателя (рис. 3, б), оригинальность которой подтверждена патентом РФ № 2350435.

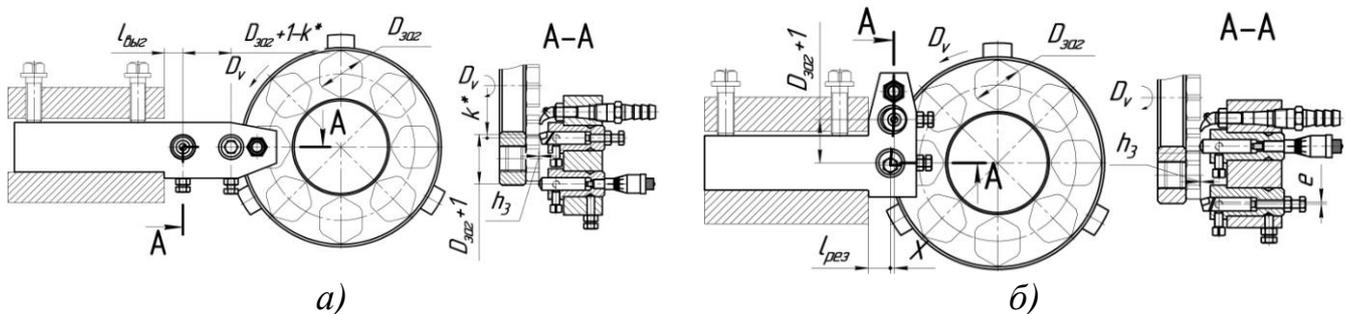


Рис. 3. Комбинированный инструмент с планшайбой:

- а) с продольным расположением резца и алмазного выглаживателя;
- б) с поперечным расположением резца и алмазного выглаживателя

В конструкции комбинированного инструмента с поперечным расположением резца и выглаживателя и торцевой фрезы предусмотрены сменные эксцентриковые втулки, которые позволяют производить быструю установку и регулировку резца и выглаживателя в корпусе инструмента относительно оси шпинделя станка по формуле (3). Принятие эксцентриситета  $e$  позволяет за поворот втулки на одну риску на ней осуществлять радиальные перемещения инструмента вдоль оси на расстояние  $q$ .

$$q = e - e \cdot \cos \delta, \quad (3)$$

где  $q$  – радиальное перемещение инструмента относительно оси шпинделя станка, мм;  $e$  – эксцентриситет втулки, мм;  $\delta$  – угол на который нужно повернуть эксцентриковую втулку для установки радиального положения инструментов.

В ходе определения основных конструктивных и назначаемых технологических параметров комбинированного инструмента и приспособления для токарной обработки ПТП были предложены зависимости для рациональной настройки конструкции комбинированного инструмента с поперечным расположением резца и выглаживателя (4) и планшайбы (5), связывающие конструктивные параметры инструмента, технологической оснастки и заготовки с технологическими режимами обработки при точении и последующем алмазном выглаживании.

$$X = \begin{pmatrix} \left[ k^* + \sqrt{R_{\text{рез}}^2 - (R_{\text{рез}} - t_1)^2} \right] + \left[ \frac{D_{\text{заг}}}{2} \left( \frac{1,5 \cdot Z}{\pi} + 1 \right) - \sqrt{\left[ \frac{D_{\text{заг}}}{2} \left( \frac{1,5 \cdot Z}{\pi} + 1 \right) \right]^2 - (D_{\text{заг}} + 1)^2} \right] - \\ - \left[ \sqrt{R_{\text{выг}}^2 - (R_{\text{выг}} - t)^2} + \Delta \right] \end{pmatrix}, \quad (4)$$

$$D_{\text{отв}} = \frac{1,5 \cdot Z \cdot D_{\text{заг}}}{\pi}. \quad (5)$$

где  $X$  – рациональное расстояние расположения резца относительно выглаживателя, мм;  $D_{\text{отв}}$  – диаметр расположения центров резьбовых отверстий планшайбы, мм;  $Z$  – количество заготовок в планшайбе.

Для определения одного из показателей качества, на основании теоретических исследований при изучении научной литературы, разработаны математические модели формирования шероховатости при обработке прерывистой ПТП ЭДМ.

В качестве базовой модели использована модель А. Г. Суслова (6), в которую внесены уточнения – вторая составляющая  $h_2$ , учитывающая изменение сил при комбинированном способе обработки ПТП ЭДМ на специальных установочно-зажимных приспособлениях. Для расчёта составляющей  $h_2$  для соответствующих комбинированных инструментов были разработаны расчётные схемы: рис. 4, а – для комбинированного инструмента с приспособлением для фрезерной обработки ПТП электротехнических деталей «Основание»; рис. 4, б – для комбинированного инструмента с продольным расположением резца и выглаживателя; рис. 4, в – для комбинированного инструмента с поперечным расположением резца и выглаживателя, по которым были получены соответствующие зависимости (7), (8) и (9).

$$Rz = h_1 + h_2 + h_3 + h_4, \quad Ra = 0,25 \cdot Rz. \quad (6)$$

Составляющие  $h_1$ ,  $h_3$  и  $h_4$  определяются по зависимостям, полученных А. Г. Сусловым для отделочно-упрочняющей обработки поверхностно-пластическим деформированием (ОУО ППД).

При расчёте составляющей шероховатости  $h_2$  учитывается изменение сил при комбинированном способе обработки ПТП ЭДМ, обусловленное амплитудой колебаний вершины резца относительно обрабатываемой поверхности в результате изменения толщины срезаемого слоя при прохождении режущей кромки резца по выступу или впадине исходной шероховатости поверхности  $Rz_u$ , обеспечиваемой перед чистовым точением (зависимости (10) и (11)), и неравномерностью твёрдости заготовки ( $HV_{\text{max}} - HV_{\text{min}}$ ) на различных участках обрабатываемой поверхности при алмазном выглаживании (зависимость (12)).

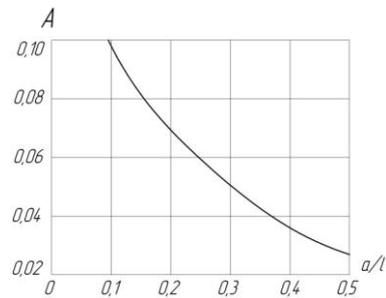
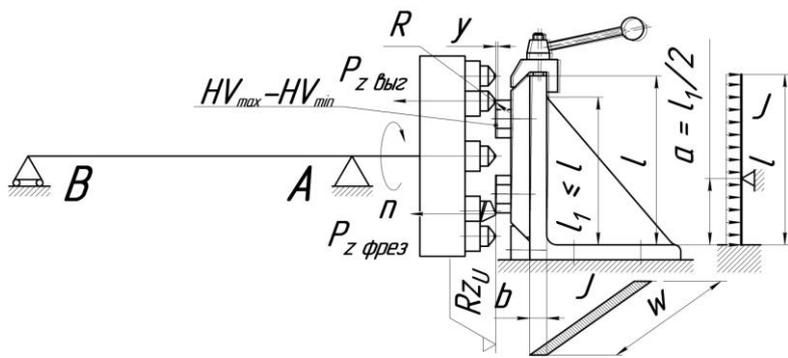


Рис. 5 – Коэффициент, учитывающий характер распределения нагрузки и вид опор

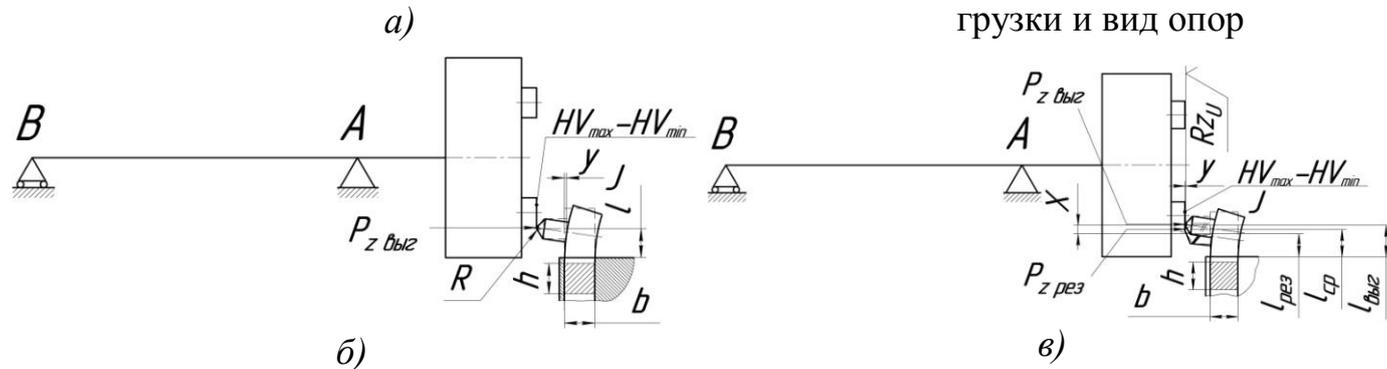


Рис. 4. Расчётные схемы для определения составляющей шероховатости  $h_2$ :

- а) для комбинированного инструмента с приспособлением для обработки ПТП электротехнических деталей «Основание»;
- б) для комбинированного инструмента с продольным расположением резца и выглаживателя;
- в) для комбинированного инструмента с поперечным расположением резца и выглаживателя.

$$а) h_2 = \frac{6 \cdot k \cdot A \cdot [(P_{x \text{ фрез max}} - P_{x \text{ фрез min}}) \cdot i + 2 \cdot (P_{z \text{ выг max}} - P_{z \text{ выг min}}) \cdot j] \cdot l^3}{E \cdot b \cdot w^3}, \quad (7)$$

$$б) h_2 = \frac{4 \cdot k \cdot (P_{z \text{ выг max}} - P_{z \text{ выг min}}) \cdot l^3}{E_{cm} \cdot b \cdot h^3}, \quad (8)$$

$$в) h_2 = \frac{8 \cdot k \cdot \left[ (P_{z \text{ выг max}} - P_{z \text{ выг min}}) \cdot l_{\text{выг}} + (P_{z \text{ рез max}} - P_{z \text{ рез min}}) \cdot l_{\text{рез}}^* \right] \cdot \left[ \frac{l_{\text{выг}} + l_{\text{рез}}^*}{2} \right]^3}{E_{cm} \cdot b \cdot h^3 \cdot (l_{\text{выг}} + l_{\text{рез}}^*)}, \quad l_{\text{выг}} = l_{\text{рез}} + X, \quad l_{\text{рез}}^* = l_{\text{рез}} + k^* \quad (9)$$

Для зависимостей (7), (8) и (9):  $A$  – коэффициент, учитывающий характер распределения нагрузки и вид опор (определяется по рис. 5);  $k$  – поправочный коэффициент для расчёта составляющей  $h_2$  при обработке меди, (определяется на основании экспериментальных исследований);  $P_{x \text{ фрез}}$  – сила при фрезеровании резцами, Н;  $P_{z \text{ выг}}$  – сила при выглаживании, Н;  $P_{z \text{ рез}}$  – сила при точении, Н;  $i$  и  $j$  – количество резцов и алмазных выглаживателей;  $l$  (для зависимости (7)) – высота боковой поверхности приспособления для фрезерования от верхней грани опоры, м;  $l$  (для зависимости (8)) расстояние между алмазным выглаживателем и краем резцедержателя суппорта станка, м;  $E$  и  $E_{cm}$  – модуль упругости, для материала из которого изготовлен корпус приспособления для фрезерования и инструмент, МПа;  $w$  – длина корпуса приспособления, м;  $b$  – ширина корпуса инструмента (приспособления), м;

$h$  – высота корпуса державки резца, м;  $l_{рез}$  и  $l_{выг}$  – расстояние от резца или выглаживателя до края резцедержателя станка, м;  $X$  – рациональное расстояние расположения резца относительно выглаживателя, мм;  $k^*$  – расстояние от оси резца до вершины режущей кромки (определяется из геометрии инструмента).

$$(P_{x_{фрез\ max}} - P_{x_{фрез\ min}}) = \frac{10 \cdot C_p \cdot [t_{max}^x - (t_{max} - Rz_u)^x] \cdot s_x^y \cdot B^u \cdot z}{D_{рез}^q \cdot n^w} \cdot K_{MP}, \quad (10)$$

$$(P_{z_{рез\ max}} - P_{z_{рез\ min}}) = 10 \cdot C_p \cdot [t_{max}^x - (t_{max} - Rz_u)^x] \cdot s_x^y \cdot v^n \cdot K_p, \quad (11)$$

$$(P_{z_{выг\ max}} - P_{z_{выг\ min}}) = 0,025 \cdot \pi \cdot g \cdot (HV_{max} - HV_{min}) \cdot R^2 \cdot \varepsilon \cdot [5 + \pi + (2 - \varepsilon) / \sqrt{2\varepsilon}]. \quad (12)$$

При расчёте составляющей шероховатости  $h_3$ , помимо сил возникающих при алмазном выглаживании, наблюдаются ещё силы возникающие при лезвийной обработке. Эти силы не равны по модулю и направлению. При использовании многоместного приспособления, эти силы могут действовать как по отдельности, так и совместно. В результате чего изменяется результирующая сила, действующая на комбинированный инструмент и вызывающая его отжатие. Полная осевая составляющая силы определяется по зависимостям: (13) – для фрезерной обработки деталей «Основание» на специальном установочно-зажимном приспособлении, (14) и (15) – для токарной обработки комбинированными инструментами с поперечным и продольным расположением инструментов.

$$P_z = 0,5 \cdot \sum_0^i P_{x_{фрез\ i}} + \sum_0^j P_{z_{выг\ j}}, \quad P_{x_{фрез}} = \frac{10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot s_x^y \cdot B^u \cdot z}{D_{рез}^q \cdot n^w} \cdot K_{MP}, \quad (13)$$

$$P_z = \frac{2 \cdot [P_{z_{выг}} \cdot (l_{рез} + X) + P_{z_{рез}} \cdot (l_{рез} + k^*)]}{2 \cdot l_{рез} + X + k^*}, \quad P_{z_{рез}} = 10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot s_x^y \cdot v^n \cdot K_p, \quad (14)$$

$$P_{z_{выг}} = 0,025 \cdot \pi \cdot g \cdot HV \cdot R^2 \cdot \varepsilon \cdot [5 + \pi + (2 - \varepsilon) / \sqrt{2\varepsilon}]. \quad (15)$$

Для установившегося процесса алмазного выглаживания при расчёте силовых факторов справедливы зависимости, полученные на предыдущем этапе исследования, но для участка, на котором происходит внедрение инструмента в заготовку (фаза внедрения) (рис. 6), данные формулы не обеспечивают достаточную точность, что требует дополнительного изучения процесса прерывистого выглаживания плоских поверхностей ЭДМ, обработанных комбинированным инструментом.

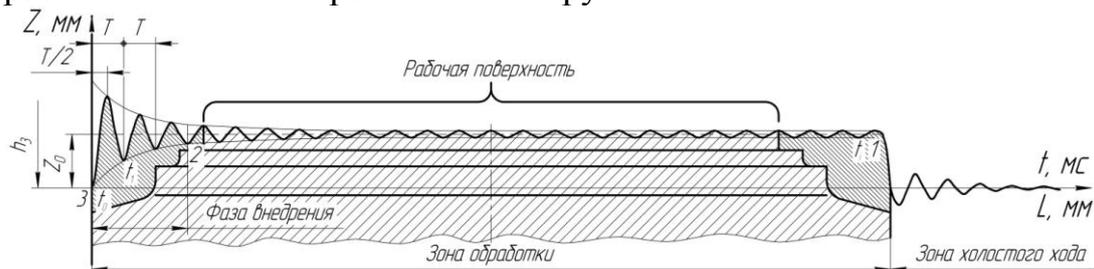


Рис. 6. Результирующая деформация державки комбинированного инструмента в процессе прерывистого выглаживания одной заготовки

Согласно рис. 6:  $h_3$  – предварительный натяг при алмазном выглаживании, м;  $Z_0$  – отжатие комбинированного инструмента от поверхности обрабатываемого материала (нулевая амплитуда), рассчитывается по формуле (16), м;  $Z$  – величина отжатия инструмента от обрабатываемой поверхности, м;  $t$  – время обработки, с.

$$Z_0 = \frac{P_{z \text{ ВЫГ}} \cdot l_{\text{выг}}^3}{3 \cdot E_{cm} \cdot J}, \quad (16)$$

где  $P_{z \text{ ВЫГ}}$  – осевая составляющая силы выглаживания, Н;  $l_{\text{выг}}$  – расстояние между алмазным выглаживателем и краем резцедержателя суппорта станка, м;  $E_{cm}$  – модуль упругости материала державки резца, МПа;  $J$  – момент инерции прямоугольного сечения державки, мм<sup>4</sup>.

В ходе предварительных экспериментальных исследований процесса прерывистого алмазного выглаживания ПТП на участке поверхности, на котором происходит внедрение выглаживателя в заготовку (фаза внедрения) невооружённым глазом наблюдалась интенсивная затухающая волнистость и снижение качества поверхностного слоя. С увеличением длины фазы внедрения качество поверхностного слоя снижалось, в связи с чем встал вопрос об определении длины фазы внедрения и возможность снижения её влияния на качество поверхностного слоя при процессе прерывистого алмазного выглаживания ПТП.

Установлено, что для определения длины фазы внедрения целесообразно использовать зависимость, предложенную В. М. Браславским. Данная зависимость справедлива при обработке цилиндрических валов, но при алмазном выглаживании прерывистых ПТП имеет погрешность. В связи с чем, было предложено внести исправление при помощи коэффициента длины фазы внедрения  $m$  (зависимость 17).

Согласно работе В. М. Браславского, длина фазы внедрения комбинированного инструмента растёт по мере увеличения усилия при ППД и уменьшения твёрдости материала детали. Эту величину важно знать при проектировании технологического процесса обработки поверхности электротехнических деталей, чтобы вывести данный участок за пределы участка, который отвечает за эксплуатационные характеристики диодов и тиристоров большой мощности (рабочая поверхность).

$$L = m \cdot \sqrt{\frac{P_{z \text{ ВЫГ}}}{HV}}, \quad (17)$$

где  $L$  – длина фазы внедрения, мм;  $m$  – коэффициент длины фазы внедрения, зависящий от материала заготовки, величины предварительно заданного натяга и от радиуса скругления вершины выглаживателя (данный коэффициент определяется на основании экспериментальных исследований);  $P_{z \text{ ВЫГ}}$  – усилие при выглаживании комбинированным инструментом, Н;  $HV$  – твёрдость материала по Виккерсу, МПа.

Комбинированный способ обработки ПТП ЭДМ на теоретическом уровне рассмотрен в главе 2. Однако математические модели, описывающие данный способ, имеют допущения. Поэтому целью экспериментальных исследований являлась проверка основных положений и результатов проведенных теоретических исследований данного процесса.

**В третьей главе** представлена методика и средства проведения экспериментального исследования влияния технологических параметров на качество обработки ПТП ЭДМ комбинированным инструментом, которая позволяет получать точные и надёжные экспериментальные данные.

Для проведения экспериментальных исследований был выбран токарно-винторезный станок 16А20Ф3 высокой точности и жесткости, в условиях лаборатории «Металлорежущие станки» ТИ Госуниверситет – УНПК, обеспечивающий минимальную подачу  $S = 0,01$  мм/об, и максимальную частоту вращения шпинделя  $n = 2200$  об/мин. Выглаживание производилось с применением смазочно-охлаждающих технологического средства – индустриального масла И-20.

Процесс выглаживания совмещался в одной операции с чистовым точением резцом с пластиной из твёрдого сплава ВК8. Для проведения исследований был выбран способ выглаживания с жёстким закреплением инструмента.

Для контроля качества ПТП ЭДМ использовались современных средств контроля: профилометр-профилограф АБРИС-ПМ 7.2, производственная измерительная система АБРИС-К 10.2 исп. 3; исследовательский микроскоп отраженного света «Axioskop» 2 МАТ немецкой фирмы «Carl Zeiss».

Для контроля микротвердости в револьверное устройство исследовательского микроскопа отраженного света «Axioskop» 2 МАТ установлен микротвердомер «МНТ-10», проводящий измерения по методу Виккерса с диапазоном нагружения алмазного наконечника от 0,005 до 4 Н.

**В четвёртой главе** для достижения поставленной цели исследовались зависимости шероховатости обработанной поверхности  $Ra$ , длины фазы внедрения  $L$  и отклонения профиля от прямолинейности (плоскостности) от технологических факторов, в качестве которых выбраны параметры режимов комбинированной обработки:  $Ra_{\text{точ}}$  – среднее арифметическое отклонение профиля исходной шероховатости поверхности перед выглаживанием, мкм;  $h_3$  – величина предварительно заданного натяга, мм;  $S_{\text{выг}}$  – подача при алмазном выглаживании, мм/об;  $V$  – скорость алмазного выглаживания ПТП ЭДМ, м/мин;  $R_{\text{выг}}$  – радиус скругления вершины выглаживателя, мм.

Сущность данного исследования сводится к получению регрессионных математических моделей определения шероховатости обрабатываемой ПТП комбинированным инструментом с продольным расположением резца и выглаживателя, а также сравнение полученных данных с расчетными, при помощи зависимостей (6), (8), (12) и (15).

Использованы методы многофакторного планирования. Статистическая обработка экспериментальных данных производилась на ПЭВМ с помощью программы Statistica® StatSoft Inc., многофакторного регрессионного анализа методом наименьших квадратов.

В результате обработки экспериментальных данных были получены коэффициенты уравнения регрессии со статистическим уровнем значимости ( $p$  – уровень) менее 0,05 и уравнение регрессии влияния технологических факторов на шероховатость обработанной поверхности ЭДМ  $Ra_{\text{выг}}$  (18). Данное уравнение учитывает технологическую наследственность – исходные характеристики микрогеометрии поверхности перед выглаживанием.

$$Ra = 1,6578 + 12,2531 \cdot S + 40,1981 \cdot h_3^2 + 0,0979 \cdot Ra_{\text{точ}} - 1,6480 \cdot R + 0,3618 \cdot R^2 - 104,9883 \cdot S \cdot h_3 - 1,2938 \cdot S \cdot Ra_{\text{точ}} - 3,5469 \cdot S \cdot R + 0,00029 \cdot R \cdot V + 49,8327 \cdot S \cdot h_3 \cdot R - 0,7140 \cdot h_3 \cdot Ra_{\text{точ}} \cdot R + 10,0880 \cdot S \cdot h_3 \cdot Ra_{\text{точ}} \cdot R \quad (18)$$

На рис. 7 представлены графики влияния технологических факторов на шероховатость обработанной поверхности.

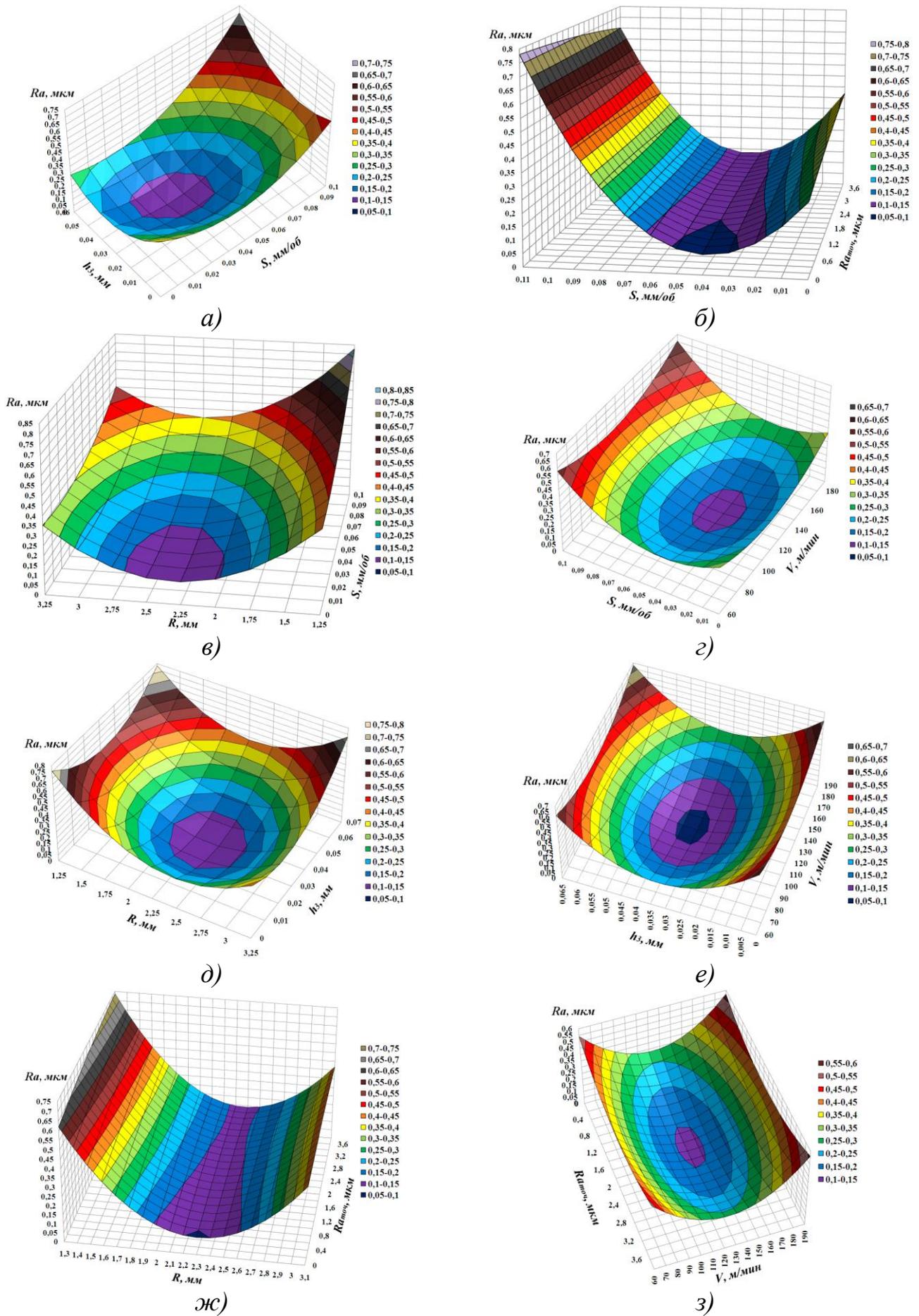


Рис. 7. Графики влияния технологических факторов на шероховатость обработанной поверхности:

- а)  $Ra = 0,4245 - 7,0436 \cdot S - 11,7997 \cdot h_3 + 76,9425 \cdot S^2 + 58,3983 \cdot S \cdot h_3 + 157,8622 \cdot h_3^2$ ;
- б)  $Ra = 0,2814 - 10,6927 \cdot S + 0,049 \cdot Ra_{точ} + 138,3797 \cdot S^2 - 0,5206 \cdot S \cdot Ra_{точ} - 0,0033 \cdot Ra_{точ}^2$ ;
- в)  $Ra = 1,584 + 1,9539 \cdot S - 1,269 \cdot R + 33,6105 \cdot S^2 - 1,0237 \cdot S \cdot R + 0,2739 \cdot R^2$
- г)  $Ra = 0,6875 - 5,473 \cdot S - 0,0077 \cdot V + 76,3847 \cdot S^2 + 0,0038 \cdot S \cdot V + 3,1557 \cdot 10^{-5} \cdot V^2$ ;
- д)  $Ra = 2,2958 - 15,26 \cdot h_3 - 1,6439 \cdot R + 190,4334 \cdot h_3^2 + 1,8244 \cdot h_3 \cdot R + 0,3308 \cdot R^2$ ;
- е)  $Ra = 1,0529 - 22,6642 \cdot h_3 - 0,01 \cdot V + 347,0028 \cdot h_3^2 + 0,0051 \cdot h_3 \cdot V + 4,0714 \cdot 10^{-5} \cdot V^2$ ;
- ж)  $Ra = 2,8564 + 0,0711 \cdot Ra_{точ} - 2,397 \cdot R - 0,0044 \cdot Ra_{точ}^2 - 0,0181 \cdot Ra_{точ} \cdot R + 0,5202 \cdot R^2$ ;
- з)  $Ra = 1,2805 - 0,1402 \cdot Ra_{точ} - 0,0163 \cdot V + 0,0361 \cdot Ra_{точ}^2 + 4,3444 \cdot 10^{-6} \cdot Ra_{точ} \cdot V + 6,6134 \cdot 10^{-5} \cdot V^2$ .

Из графиков видно, что при увеличении глубины выглаживания (предварительного заданного натяга инструмента  $h_3$ ) шероховатость уменьшается, а для определенной ее величины изменение шероховатости прекращается. Это можно объяснить тем, что при малых глубинах инструмент контактирует с обрабатываемой поверхностью по вершинам неровностей, опорная площадь которых мала. Вследствие этого на поверхности контакта развиваются значительные давления, превышающие предел текучести материала и вызывающие интенсивную пластическую деформацию неровностей. По мере роста глубины выглаживания увеличивается площадь контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью. В процессе ППД поверхностный слой металла значительно упрочняется, что увеличивает сопротивление поверхности пластической деформации, поэтому уменьшение шероховатости с увеличением глубины замедляется.

При определенных значениях глубины выглаживания исходные неровности полностью сглаживаются, и образуется шероховатость, обусловленная самим процессом выглаживания (величиной подачи). Дальнейшее увеличение глубины выглаживания увеличивает величину пластических искажений, высота неровностей возрастает по сравнению с наименьшей, поверхностные слои разрушаются и появляются трещины.

При изменении подачи от 0,032 до 0,10 мм/об при обработке меди шероховатость возрастает, при этом величина остаточной пластической деформации уменьшается. Наименьшая шероховатость достигается при подачах от 0,025 до 0,045 мм/об, а при подаче ниже 0,032 мм/об – возрастает, что можно объяснить перенаклепом поверхностного слоя.

При изменении скорости от 60 до 120 м/мин величина шероховатости плавно уменьшается. Рост скорости выглаживания от 120 до 180 м/мин приводит к увеличению шероховатости из-за нагрева выглаживающего элемента. При больших скоростях (180 м/мин и более) алмаз из-за перегрева сильно изнашивается. В этом случае необходимо обильное охлаждение зоны контакта алмаза с обрабатываемой поверхностью.

Из графиков видно, что на шероховатость  $Ra$  ПТП ЭДМ оказывает влияние качество исходной поверхности перед выглаживанием ( $Ra_{точ}$ ). Установлено, что чем меньше шероховатость исходной ПТП, получаемая перед алмазным выглаживанием, тем лучшего качества получается поверхность после окончательной обработки. На данных графиках прослеживается технологическая наследственность шероховатости.

Необходимая величина радиуса зависит от твердости обрабатываемого материала заготовки и допустимой величины силы. Так как колебания твердости для заготовки незначительны, то для нашего случая величина радиуса зависит от допустимой величины силы. Так с увеличением радиуса с 1,5 до 2,3 мм наблюдается снижение шероховатости поверхности до определённого значения, из-за уменьшения контактных давлений в зоне обработки. При дальнейшем увеличении радиуса алмазного выглаживателя наблюдается увеличение шероховатости, так как из-за дальнейшего снижения удельных давлений стало увеличиваться сопротивление поверхности пластической деформации.

Установлено, что при подаче  $S_{\text{выг}} = 0,032$  мм/об, предварительном натяге инструмента  $h_3 = 0,03$  мм, исходной шероховатости поверхности перед выглаживанием  $Ra_{\text{точ}} = 0,32$  мкм, радиусе скругления вершины выглаживателя  $R_{\text{выг}} = 2,3$  мм и скорости обработки  $V = 120$  м/мин можно добиться наилучшего качества ПТП ЭДМ при комбинированной обработке точением и алмазным выглаживанием, примерно равной  $Ra$  0,08 мкм, что до 8 раз меньше высоты микронеровностей обработанной поверхности, получаемой после шлифования.

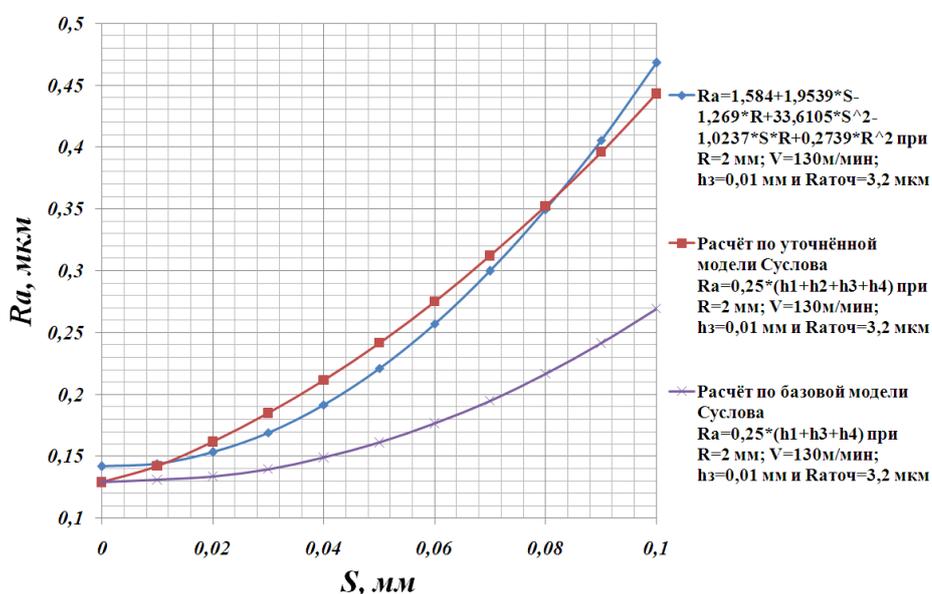


Рис. 8. Сравнение расчётных кривых шероховатости обрабатываемой ПТП ЭДМ при различных методиках расчёта с графиком, полученным в ходе экспериментального исследования

полученных при помощи зависимостей (6), (8), (12) и (15), показало расхождение не более 10%, что является приемлемым, учитывая прерывистость процесса обработки. А для данных, полученных по методике А. Г. Суслова, расхождение составило более 10%.

Установлено, что отклонения от прямолинейности при комбинированной обработке точением и алмазным выглаживанием ПТП ЭДМ не превышало значения, требуемого по чертежу (10 мкм), и улучшение составляло до 5 раз, в зависимости от назначаемых режимов обработки. Чем меньше подача  $S_{\text{выг}}$  и предварительный натяг инструмента  $h_3$  при выглаживании, тем ниже было отклонение от прямолинейности.

На рисунке 8 представлены графики сравнения расчётных кривых шероховатости обрабатываемой ПТП ЭДМ комбинированным инструментом с продольным расположением резца и выглаживателя по математическим моделям, которые предложены в главе 2, с графиком, полученным в ходе экспериментального исследования.

Сопоставление экспериментальных и расчётных данных, полу-

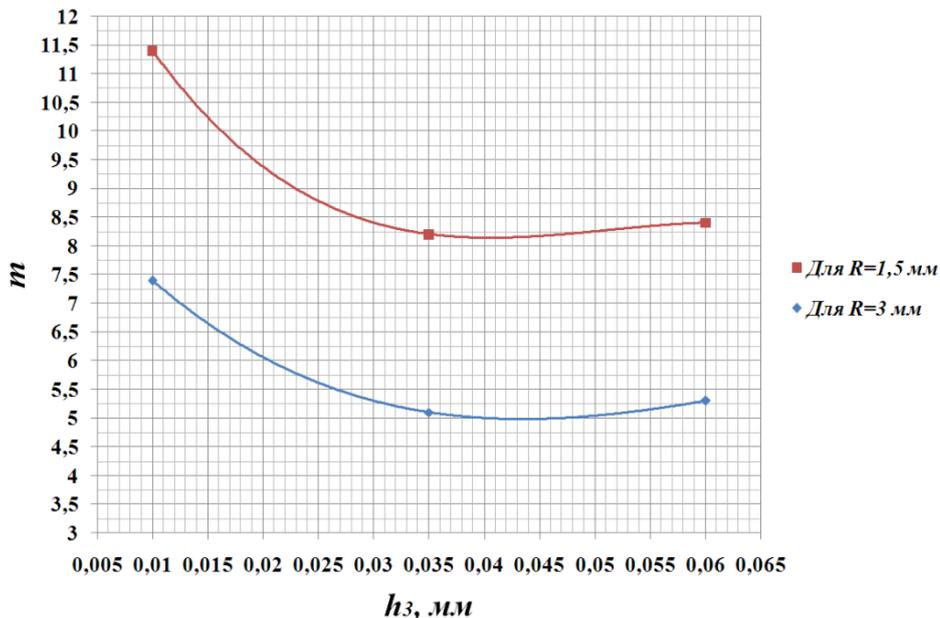


Рис. 9. Влияние предварительного натяга алмазного выглаживателя  $h_3$  на коэффициент длины фазы внедрения  $m$  при прерывистой обработке ПТП ЭДМ

В ходе экспериментальных исследований получены графики влияния предварительного натяга алмазного выглаживателя  $h_3$  на коэффициент длины фазы внедрения  $m$  при прерывистой обработке ПТП ЭДМ (рис. 9). Из графиков видно, что при предварительном натяге алмазного выглаживателя  $h_3 \approx 0,035$  мм полученный коэффициент длины фазы внедрения  $m$  обладает наименьшим значением. В результате чего для заготовок устанавливается

наименьшая длина фазы внедрения комбинированного инструмента и улучшается качество поверхностного слоя.

**В пятой главе** проведён анализ экономической эффективности и производительности комбинированных инструментов и приспособлений для закрепления и обработки заготовок точением или фрезерованием с последующим алмазным выглаживанием ПТП ЭДМ.

Установлено, что при использовании комбинированного инструмента с продольным расположением резца и алмазного выглаживателя рост производительности труда составил до 55,5%, с поперечным расположением – до 63,8%, а для комбинированного инструмента с многоместным установочно-зажимным приспособлением для фрезерной обработки и последующего алмазного выглаживания – до 53,2%.

Установлено, что комбинированный инструмент с продольным расположением резца и алмазного выглаживателя более экономически эффективен (в 6,9 раза), а с поперечным расположением – (в 7,3 раза), чем комбинированный инструмент с многоместным установочно-зажимным приспособлением для фрезерной обработки и последующего алмазного выглаживания ПТП ЭДМ. Гарантированный срок окупаемости проекта по внедрению комбинированного инструмента с продольным и поперечным расположением резца и алмазного выглаживателя при использовании 8-ми позиционной планшайбы для изготовления ЭДМ при рекомендованных режимах обработки составит соответственно 1,05 и 1,00 месяца, а ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения – соответственно до 250 и более 260 тыс. руб/год, что подтверждает экономическую целесообразность промышленного внедрения разработанного инструмента и оснастки.

Построены графики влияния режимов обработки ПТП ЭДМ комбинированным инструментом с продольным расположением резца и алмазного выглаживателя с применением 8-ми позиционной планшайбы на экономическую эффективность (рис. 10).

Установлено, что наибольшее влияние на экономическую эффективность обработки ПТП ЭДМ комбинированным инструментом с продольным расположением резца и алмазного выглаживателя с применением планшайбы оказывает изменение подачи, а скорость – наименьшее. Выявлено, что при совместном влиянии подачи и скорости, производительность улучшается по сравнению с графиком влияния подачи, только при режимах обработки выше  $S = 0,05$  мм/об и  $V = 120$  м/мин.

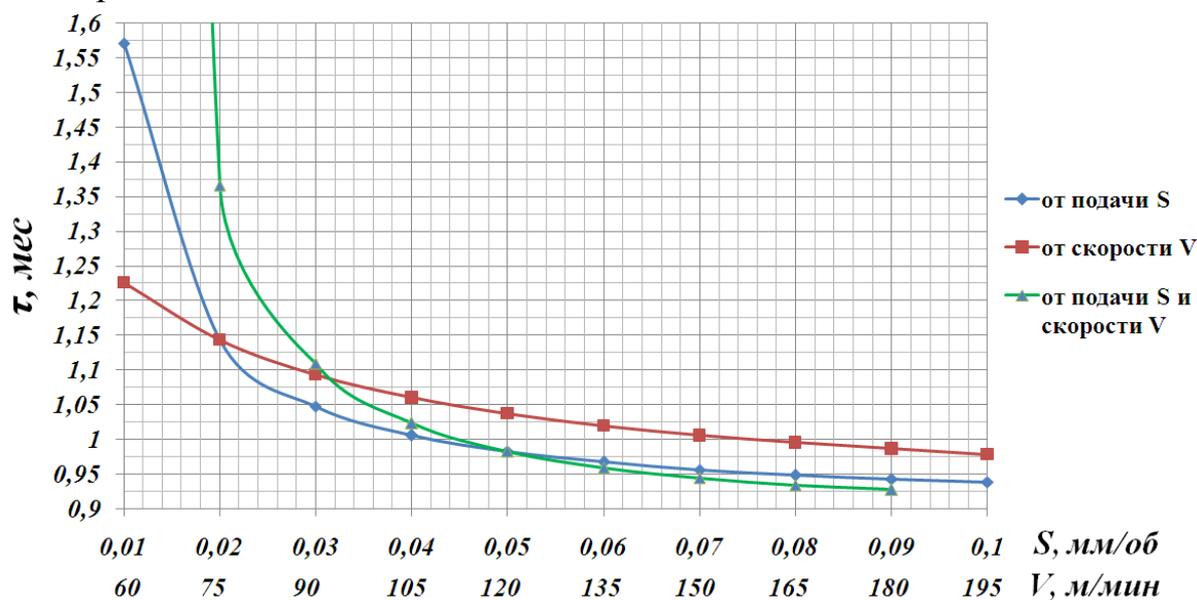


Рис. 10. Влияние режимов обработки ПТП ЭДМ комбинированным инструментом с продольным расположением резца и алмазного выглаживателя с применением 8-ми позиционной планшайбы на экономическую эффективность

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

1. В представленной научно-квалификационной работе изложены научно обоснованные технические, технологические решения и разработки, направленные на повышение производительности и качества обработки плоских торцовых поверхностей медных электротехнических деталей комбинированным инструментом, имеющие существенное значение для машиностроения.

2. Разработаны конструкции комбинированных инструментов и приспособлений для фрезерной или токарной обработки с последующим алмазным выглаживанием торцовых поверхностей деталей из меди, для которых определены основные конструктивные и назначаемые технологические параметры обрабатывающих инструментов. Конструкции комбинированных инструментов и приспособлений защищены патентами РФ на изобретения № 2338631 от 20.11.2008, № 2350435 и № 2350458 от 27.03.09.

3. Получены зависимости для рациональной настройки конструкций комбинированных инструментов и приспособлений, связывающие конструктивные параметры с назначаемыми технологическими параметрами процессов обработки при точении или фрезеровании и последующем алмазном выглаживании.

4. Уточнена математическая модель А. Г. Сулова применительно к определению шероховатости при комбинированном способе обработки плоских торцовых поверхностей электротехнических деталей из меди. При расчёте второй составляющей  $h_2$  учтено изменение сил, обусловленное неравномерностью твёрдости заготовки ( $HV_{\max} - HV_{\min}$ ) на различных участках обрабатываемой поверхности при алмаз-

ном выглаживании и амплитудой колебаний вершины резца относительно обрабатываемой поверхности в результате изменения толщины срезаемого слоя при прохождении режущей кромки резца по выступу или впадине исходной шероховатости поверхности  $Rz_{и}$ , обеспечиваемой перед чистовым точением.

5. Установлено преимущественное влияние на качество поверхностного слоя длины фазы внедрения инструмента в заготовку при прерывистом алмазном выглаживании плоских торцовых поверхностей, уточнена формула В. М. Браславского для определения длины фазы внедрения за счёт введения коэффициента  $m$  и определения диапазона его возможных значений.

6. Установлено, что при предварительном заданном натяге алмазного выглаживателя  $h_3 = 0,01 \dots 0,035$  мм и радиусе скругления вершины выглаживателя  $R_{выг} = 1,5$  мм коэффициент длины фазы внедрения  $m$  изменяется в диапазоне от 11,5 до 8,2, а для  $R_{выг} = 3$  мм – от 7,35 до 5,1. При  $h_3 = 0,035 \dots 0,06$  мм и при  $R_{выг} = 1,5$  мм коэффициент изменяется в диапазоне от 8,2 до 8,4, а для  $R_{выг} = 3$  мм – от 5,1 до 5,3. При  $h_3 \approx 0,035$  мм полученный коэффициент обладает наименьшим значением, в результате чего для заготовок устанавливается наименьшая длина фазы внедрения алмазного выглаживателя и улучшается качество поверхностного слоя.

7. Установлено, что при подаче  $S_{выг} = 0,032$  мм/об, предварительном натяге инструмента  $h_3 = 0,03$  мм, исходной шероховатости поверхности перед выглаживанием  $Ra_{точ} = 0,32$  мкм, радиусе скругления вершины выглаживателя  $R_{выг} = 2,3$  мм и скорости обработки  $V = 120$  м/мин можно добиться наилучшего качества плоской торцовой поверхности электротехнических деталей из меди при комбинированной обработке точением и алмазным выглаживанием, примерно равной  $Ra$  0,08 мкм, что до 8 раз меньше высоты микронеровностей обработанной поверхности, получаемой после шлифования.

8. Установлено, что отклонение от прямолинейности при комбинированной обработке точением и алмазным выглаживанием плоской торцовой поверхности электротехнических деталей из меди не превышало значения, требуемого по чертежу (10 мкм), и улучшение составляло до 5 раз, в зависимости от назначаемых режимов обработки. Чем меньше подача  $S_{выг}$  и предварительный натяг инструмента  $h_3$  при выглаживании, тем ниже было отклонение от прямолинейности.

9. Установлено, что при использовании комбинированного инструмента с продольным расположением резца и алмазного выглаживателя рост производительности труда составил до 55,5%, с поперечным расположением – до 63,8%, а для комбинированного инструмента с многоместным установочно-зажимным приспособлением для фрезерной обработки и последующего алмазного выглаживания – до 53,2%.

10. Установлено, что комбинированный инструмент с продольным расположением резца и алмазного выглаживателя более экономически эффективен (в 6,9 раза), а с поперечным расположением – (в 7,3 раза), чем комбинированный инструмент с многоместным установочно-зажимным приспособлением для фрезерной обработки и последующего алмазного выглаживания плоских торцовых поверхностей.

11. Комбинированные инструменты, приспособления и технологические рекомендации прошли производственную апробацию на ЗАО «Протон-Электротекс» (г. Орел), ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения составил более 260 тыс. рублей.

## Основные положения диссертации отражены в следующих работах

### *Список публикаций в изданиях, рекомендованных ВАК:*

1. Сотников, В. И. Комбинированная обработка плоских торцовых поверхностей деталей из меди [Текст] / В. И. Сотников, А. Н. Дерли, **А. Н. Ткаченко** // Известия ОрёлГТУ. Сер. «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». – 2008. – № 2-3/270 (545). – С. 33-37.
2. Сотников, В. И. Приспособление для обработки плоских торцов заготовок детали «Основание» [Текст] / В. И. Сотников, **А. Н. Ткаченко** // Известия ОрёлГТУ. Сер. «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». – 2008. – № 2-4/270 (545). – С. 92-96.
3. Сотников, В. И. Фреза для комбинированной обработки плоских торцовых поверхностей деталей из мягких материалов [Текст] / В. И. Сотников, **А. Н. Ткаченко** // Известия ОрёлГТУ. Сер. «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». – 2008. – № 2-4/270 (545). – С. 87-91.
4. Степанов, Ю. С. Оптимизация конструкции комбинированного инструмента для токарной обработки и алмазного выглаживания торцовых поверхностей деталей из меди [Текст] / Ю. С. Степанов, В. И. Сотников, **А. Н. Ткаченко** // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2011. – № 8. – С. 15-20.
5. Степанов, Ю. С. Реализация комбинированного способа обработки плоских торцов деталей из меди [Текст] / Ю. С. Степанов, В. И. Сотников, **А. Н. Ткаченко** // Известия ОрёлГТУ. Сер. «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». – 2009. – № 2-5/271 (546). – С. 46-50.
6. Степанов, Ю. С. Экспериментальное исследование процесса комбинированной обработки точением и алмазным выглаживанием торцовых поверхностей деталей из меди [Текст] / Ю. С. Степанов, В. И. Сотников, **А. Н. Ткаченко** // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2012. – № 8. – С. 43-48.
7. **Ткаченко, А. Н.** Математическая модель шероховатости поверхности электротехнических деталей из меди, обработанных комбинированным инструментом для фрезерования и алмазного выглаживания [Текст] / **А. Н. Ткаченко** // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2012. – № 2-4 (292). – С. 58-65.
8. **Ткаченко, А. Н.** Оптимизация конструкции комбинированного инструмента для фрезерной обработки и алмазного выглаживания торцовых поверхностей деталей из меди [Текст] / **А. Н. Ткаченко**, В. И. Сотников, А. Н. Ткаченко // Известия ОрёлГТУ. Сер. «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». – 2009. – № 2/3 (280). – С. 44-50.

### *Список публикаций в других изданиях:*

9. Степанов, Ю. С. Исследование влияния алмазного выглаживания на шероховатость торцовой поверхности деталей из меди [Текст] / Ю. С. Степанов, В. И. Сотников, **А. Н. Ткаченко** // Ресурсосберегающие технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня : материалы 11-ой междунар. науч.-практ. конф. В 2 ч. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – Ч. 2. – С. 296-302.
10. **Ткаченко, А. Н.** Совершенствование технологии обработки торцовой поверхности детали «Основание» диода большой мощности [Текст] / **А. Н. Ткаченко** // Совершенствование существующих и создание новых технологий в машиностроении и авиастроении : сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф., 1-3 июня 2009 года, г. Ростов-на-Дону. – Ростов н/Д : Изд-во ЮНЦ РАН, 2009. – С. 290-296.

### *Патенты РФ на изобретения:*

11. Устройство для обработки плоских торцевых поверхностей заготовок деталей из мягких сталей [Текст] / В. В. Мудров, В. И. Сотников, **А. Н. Ткаченко** : пат. 2350435 С1 РФ. № 2007120955/02 ; заявл. 04.06.2007 ; опубл. 27.03.2009. Бюл. №9. – 6 с.
12. Устройство для обработки плоских торцов заготовок из мягких сталей [Текст] / В. В. Мудров, В. И. Сотников, **А. Н. Ткаченко** : пат. 2350458 С1 РФ. № 2007120987/02 ; заявл. 04.06.07 ; опубл. 27.03.09, Бюл. № 9. – 6 с.
13. Фреза комбинированная для обработки плоских торцовых поверхностей заготовок деталей из мягких материалов [Текст] / В. В. Мудров, В. И. Сотников, **А. Н. Ткаченко**: пат. 2338631 С1 РФ. № 2007120954/02 ; заявл. 04.06.2007 ; опубл. 20.11.2008. Бюл. № 32. – 6 с.

Подписано в печать: «25» октября 2012 г.

Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 1,25. Тираж: 100 экз. Заказ №05ОП/12

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе

ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК». Россия, 302030, г. Орёл, ул. Московская, д. 65