

На правах рукописи



ЗОТОВ АЛЕКСЕЙ ВИКТОРОВИЧ

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ  
ПАР СМЕШАННОГО ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ  
ПУТЕМ ПЛАКИРОВАНИЯ ГИБКИМ ИНСТРУМЕНТОМ

Специальность 05.02.08 – Технология машиностроения  
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Ульяновск 2015

Работа выполнена на кафедре «Оборудование и технологии машиностроительного производства» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Тольяттинский государственный университет» (ФГБОУ ВПО «ТГУ»)

- |                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Научный руководитель:  | - ДРАЧЕВ ОЛЕГ ИВАНОВИЧ,<br>заслуженный деятель науки Российской Федерации,<br>доктор технических наук, профессор                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Официальные оппоненты: | - БЕЛЕВСКИЙ ЛЕОНИД СЕРГЕЕВИЧ,<br>доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова», профессор кафедры «Проектирование и эксплуатация металлургических машин и оборудования»<br><br>КУРОЧКИН АНТОН ВАЛЕРЬЕВИЧ,<br>кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева», начальник управления научно-исследовательской работой |
| Ведущее предприятие:   | - Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Самарский государственный технический университет»                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |

Защита диссертации состоится «28» декабря 2015 г. в «13<sup>00</sup>» на заседании диссертационного совета Д 999.003.02 в первом корпусе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Ульяновский государственный технический университет» (ФГБОУ ВПО «УлГТУ») по адресу: г. Ульяновск, ул. Энгельса, 3 (почтовый адрес: 432027, ГСП, г. Ульяновск, ул. Северный венец, 32).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВПО «УлГТУ» - <http://www.ulstu.ru/> .

Автореферат разослан «  »                      2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Веткисов Николай Иванович

## 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** В современных условиях развития технологического комплекса России, когда более 60% производственного оборудования имеет возраст старше 20 лет, а 70 % инвестиций в основной капитал обеспечивают только 1 % обновления оборудования, возникает производственная необходимость в повышении эффективности ремонта и увеличения сроков эксплуатационной службы технологического оборудования. Учитывая, что порядка 80 % сопряжений в машинах отказывают в работе вследствие износа, а основной причиной капитального ремонта металлообрабатывающего оборудования является износ его направляющих, то выбор в качестве объекта – направляющих скольжения пар трения суппортного узла металлорежущего оборудования является актуальным.

В этих условиях внедрение нового высокопроизводительного метода комбинированной обработки поверхностей изделий машиностроения методом плакирования гибким инструментом (ПГИ) является своевременным решением поставленной производственной задачи.

Эффективность новых технологий оценивается по критериям ресурсосбережения, экологической безопасности, понижения трудоемкости, повышения износостойкости и точности обработки. ПГИ соответствует всем вышеперечисленным критериям.

Несмотря на положительные результаты использования метода ПГИ, проведенные обширные экспериментальные исследования и создание многочисленных установок, важной задачей на данный момент является создание научного подхода назначения рациональных режимов обработки изделий, изготовленных из серого чугуна.

**Цель работы** - повышение износостойкости направляющих скольжения металлообрабатывающего оборудования путем плакирования гибким инструментом.

**Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:**

1. Создан комплекс математических моделей, позволяющих определять: распределение отпечатков проволочного ворса, формирующихся при входе в контакт с обрабатываемым изделием и распределение соответствующих зон пластической деформации; геометрические, энергосиловые и тепловые характеристики при скольжении сжато-изогнутого ворса.

2. Исследовано влияние технологических режимов процесса ПГИ на геометрические и энергосиловые характеристики процесса, а также на тепловое состояние обрабатываемой поверхности, степень покрытия и равномерность упрочненного слоя.

3. Разработана технология плакирования гибким инструментом пар смешанного трения скольжения технологического оборудования с обеспечением их максимальной износостойкости.

**Научная новизна:**

1. Разработана математическая модель распределения отпечатков ворса гибкого инструмента, формирующихся при его ударном динамическом воздействии на обрабатываемую поверхность.

2. Разработана математическая модель расчета геометрических и энергосиловых параметров зоны контакта гибкого инструмента с обрабатываемым изделием, основанной на точном решении дифференциального уравнения упругой линии методом эллиптических параметров.

3. Разработана математическая модель расчета средневероятной температуры основы обрабатываемой поверхности, учитывающей взаимовлияние локальных температур контактных площадок сжато-изогнутого ворса при его скольжении.

4. На базе разработанных математических моделей исследовано влияние режимов процесса ПГИ на основополагающие параметры зоны контакта.

5. Разработан алгоритм выбора рациональных технологических параметров процесса ПГИ, учитывающий специфику обработки, с целью формирования поверхностного слоя обрабатываемых изделий с требуемым уровнем эксплуатационных характеристик.

**Практическая значимость работы** заключается в возможности использования следующих результатов:

- математических моделей расчета параметров процесса плакирования, реализованных в виде программ для ЭВМ (свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014612918, № 2014612919);

- устройств для обработки материалов методом поверхностного пластического деформирования с одновременным нанесением покрытий с расширенными технологическими возможностями (патенты на изобретение № 2360034, № 2360035);

- регрессионных моделей определения толщины формируемого покрытия и износостойкости обработанных изделий;

- методики назначения эффективных технологических режимов ПГИ для получения изделий с заданными эксплуатационными характеристиками.

**Методология и методы исследования.** Теоретические исследования проводили на основе положений технологии машиностроения, точной нелинейной теории изгиба стержней, теории вероятности, теории математического моделирования.

Экспериментальные исследования были проведены на конфокальном лазерном сканирующем микроскопе LEXT OLS4000, микроскопе металлографическом Polivar-Met (ф. Reichert, Австрия) с видеоприставкой на базе SIAMS 600, микротвердомере Wilkers мод.536 (ф. Karl Frank, США), твердомере бривископ ХПО-250 (СССР), специализированных стендах для испытаний на трение и износ, толщиномере QuaNix 4500, профилографе Hommelwerk Turbo Wave V7.20.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Комплекс математических моделей позволяющих оперированием конструктивных особенностей инструмента, тепловых и энергосиловых параметров процесса плакирования выбрать рациональные технологические режимы обработки направляющих скольжения.

2. Результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса ПГИ, позволивших установить влияние режимов обработки на основополагающие параметры зоны контакта.

3. Результаты экспериментальных исследований в виде регрессионных моделей определения толщины формируемого покрытия и износостойкости обработанных изделий.

4. Методику назначения эффективных технологических режимов ПГИ для получения изделий с заданными эксплуатационными характеристиками.

***Степень достоверности и апробация результатов.***

Результаты работы были представлены на международной научно-технической конференции «Инновация – 2008» (Ташкент, 2008 г.); международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Прогрессивные направления развития машино-приборостроительных отраслей и транспорта» (Севастополь, 2009 г.); II Всероссийской научно-практической конференции «Управление инновациями: теория, инструменты, кадры» (Санкт-Петербург, 2009 г.); XII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Механики XXI века» (Братск, 2013 г.); III Всероссийской научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием «Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке» (Ижевск, 2015); IV Международной научно-технической конференции «Теплофизические и технологические аспекты повышения эффективности машиностроительного производства» (Тольятти, 2015 г.).

Награжден медалями «Лауреат ВВЦ» (удостоверение № 420, постановление от 29.06.07 № 27) в 2007 году и «За успехи в научно-техническом творчестве» (удостоверение № 289, постановление от 15.07.08 № 34) в 2008 году за разработку технологии ремонта станин металлорежущего оборудования посредством плакирования гибким инструментом по итогам проведения выставок во Всероссийском выставочном центре (г. Москва).

Разработанная технология обработки направляющих скольжения смешанного трения металлорежущего оборудования внедрена на совместном предприятии ООО «ЛАДА ИНСТРУМЕНТ» - ОАО «АвтоВАЗ».

***Публикации, патенты и свидетельства.*** По теме диссертации опубликовано 16 работ, в том числе 5 - в изданиях из перечня ВАК РФ, получено 2 патента на изобретение и 2 свидетельства РФ о государственной регистрации программ для ЭВМ.

***Структура и объем работы.*** Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов по работе, списка литературы и приложений; содержит 197 страниц; включает 49 рисунков, 4 таблицы, 121 наименований литературы и 8 приложений.

## 2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

***Во введении*** обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, показана её научная и практическая значимость, кратко охарактеризовано направление исследования.

***В первой главе*** выполнен анализ литературных данных о современном состоянии вопроса, посвященному процессу плакирования изделий гибким инструментом.

Плакирование изделий гибким инструментом, в качестве которого, как правило, используется дисковая проволочная щетка, является комбинированным способом модификации поверхности обрабатываемого изделия, заключающийся в одновременном деформационном упрочнении поверхности и нанесении на неё покрытий из различных материалов, обладающих своими функциональными характеристиками.

Вопросами деформационного упрочнения поверхности проволочными щетками занимались Ю. Г. Проскуряков, В. С. Ершов, Д. Д. Папшев, Ю. И. Кургузов, Е. В. Перепичка.

Наибольший вклад в создание теоретических основ модификации поверхностей ПГИ выполнен в Магнитогорском государственном техническом университете им. Г.И. Носова под руководством Л.С. Белевского, И.И. Ошеверова, В.П., Анцупова, С.И. Платова, В.И. Кадошникова, А.Н. Завалищина и многих других ученых. В последние годы ПГИ активно исследуют в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси под руководством М.А. Леванцевича.

В настоящее время существует комплекс технологий, позволяющий осуществлять выбор методики ПГИ для формирования поверхностных слоев с заданным уровнем эксплуатационных характеристик.

Однако ни одна из существующих технологий не учитывает характер распределения отпечатков и зон пластической деформации, формирующихся при ударах проволочного ворса при входе в контакт с обрабатываемым изделием.

При создании моделей определения геометрических и энергосиловых параметров на участке скольжения ворса были использованы либо упрощенные решения задачи об упругой линии сильно изогнутой балки, либо решения, основанные на экспериментальных предположениях, о форме изгиба проволочки при её скольжении вдоль зоны контакта и неоправданные допущения, которых можно избежать.

При анализе теплового состояния основы обрабатываемого изделия при скольжении сжато-изогнутого ворса не были найдены сведения, позволяющие учесть взаимовлияние локальных температур контактных площадок всех проволочек инструмента на локальную температуру точечного источника и их влияния на среднюю температуру зоны контакта.

Кроме того, на данный момент, отсутствуют какие-либо основательные исследования процесса обработки изделий из серого чугуна твердостью 180-210 НВ. А серый чугун, как известно, обладает рядом специфических свойств, что отличает его не только от стали, но и от прочих видов чугуна.

На основе проведенного анализа была сформулирована цель и поставлены задачи исследования.

**Вторая глава** посвящена разработке математического аппарата для создания технологии плакирования на базе моделирования термомеханических характеристик процесса.

На первом этапе, на базе отдельных положений теории вероятности создана модель для оценки характеристик распределения отпечатков и зон пластической деформации от ударов ворсинок при входе в контакт с обрабатываемым изделием.

Исходя из кинематики процесса обработки проволочным инструментом и основываясь на выражении фактического коэффициента заполнения рабочей поверхности щетки  $\eta_\phi$  получим, что поверхностная плотность распределения отпечатков от ударов ворса по поверхности обрабатываемого изделия  $\lambda_s$  прямо пропорциональна окружной скорости вращения инструмента  $V_{ок}$ , коэффициенту  $\eta_\phi$  и обратно пропорциональна квадрату диаметра ворса  $d_B$ , а также скорости перемещения  $V_S$  обрабатываемой поверхности относительно гибкого инструмента:

$$\lambda_s = \frac{4 \cdot V_{ок} \cdot \eta_\phi}{\pi \cdot d_B^2 \cdot V_S} \quad (1)$$

Для оценки качества поверхности после обработки гибким инструментом выведем закономерности для определения степеней покрытия отпечатками соответствующей кратности. в зависимости от радиуса отпечатка и глубины пластической деформации и, как следствие, степени равномерности глубины наклепанного слоя как функцию от поверхностной плотности распределения  $\lambda_s$  и максимальной глубины наклепа  $h_s$ :

$$\psi_s = \sqrt{1 - \frac{1}{8 \cdot \pi \cdot h_s^2 \cdot \lambda_s}} \quad (2)$$

По разработанной модели на рисунке 1 представлен созданный алгоритм расчетно-аналитического метода, позволяющий подобрать рациональные технологические параметры процесса ПГИ при варьировании плотности набивки инструмента и его скорости перемещения.

На втором этапе, на базе теории гибких упругих

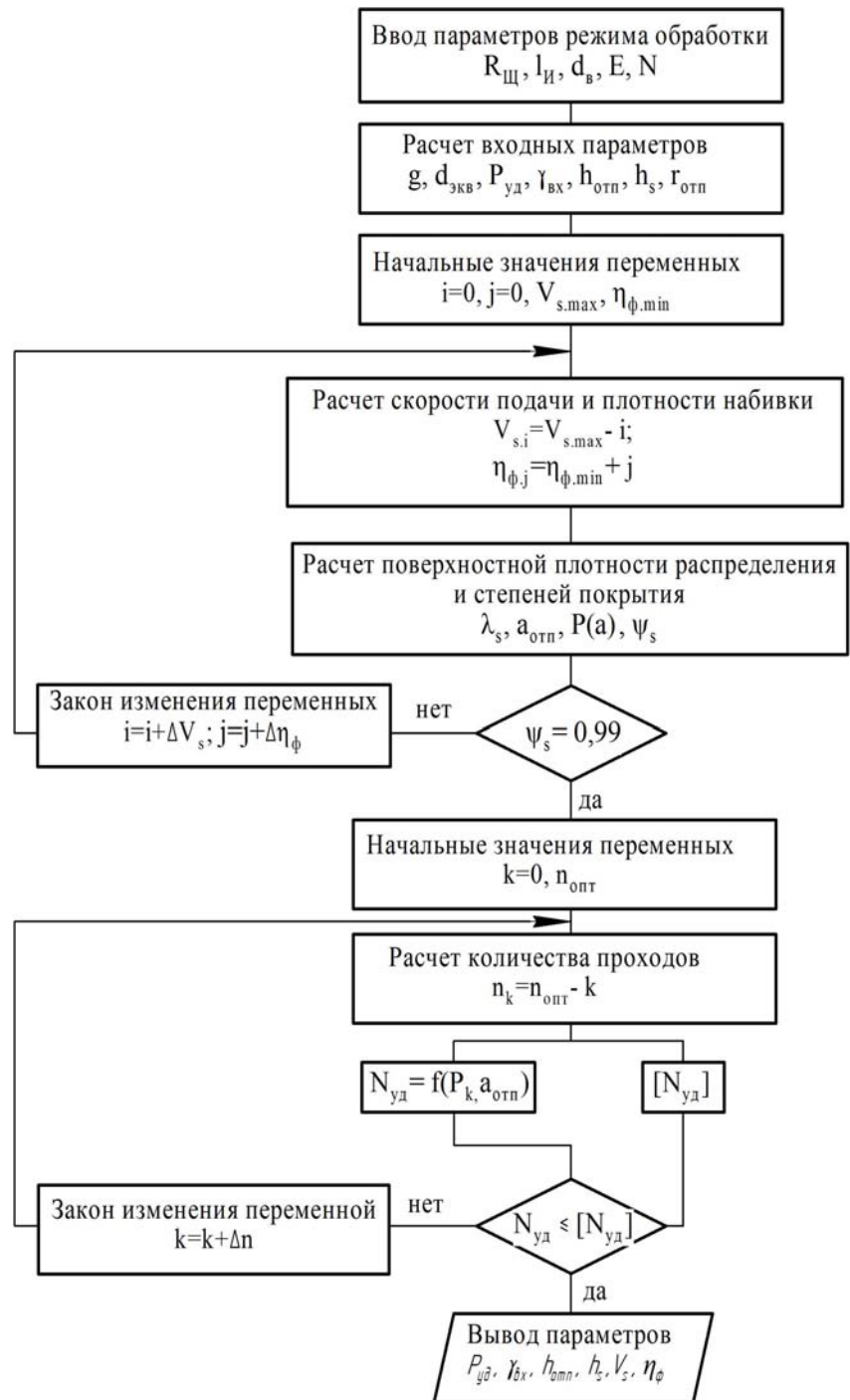


Рисунок 1 - Структурная схема алгоритма расчетно-аналитического метода определения параметров обработки на участке входа ворса в контакт с обрабатываемым изделием

стержней, была создана модель для оценки характеристик зоны контакта на участке скольжения сжато-изогнутого ворса.

Точка контакта наконечника ворсинки с обрабатываемой поверхностью  $L$  (рисунок 2) будет точкой перегиба упругой линии. Тогда, применительно к контакту ворса гибкого инструмента с обрабатываемой поверхностью, получим следующие зависимости:

$$\omega_L = 0;$$

$$2k \cos \psi_L = 0 \Rightarrow \psi_L = 90^\circ; \quad (3)$$

$$\beta = F(\psi_L) - F(\psi_0),$$

где  $\omega_L$  - моментный коэффициент подобия в точке  $L$ ;  $k = \sin(\zeta/2)/\sin \psi$  - модуль эллиптического интеграла;  $\zeta = \vartheta + \delta$  - угловой коэффициент подобия;  $\delta$  - угол наклона оси  $x$  к вектору силы  $P$  в произвольном сечении изогнутого стержня, град;  $\psi_L$  - амплитуда эллиптического интеграла (т.  $L$ );  $\beta$  - силовой коэффициент подобия;  $F(\psi_0)$  - эллиптический интеграл Лежандра первого рода;  $F(\psi_L)$  - полный эллиптический интеграл Лежандра первого рода.

Специфическим в случае больших перемещений при изгибе обстоятельством является столь же большое перемещение векторов внешних сил и моментов, под действием которых происходит изгиб. При этом закон перемещения вектора внешней силы зависит от искомых перемещений при изгибе стержня. Имеющаяся между ними зависимость, заранее неизвестна.

Угловой коэффициент подобия  $\zeta_{oi}$  в точке  $O$  (рисунок 2) и модулярный угол эллиптического интеграла на входе ворса в контакт  $\alpha_{ex}$  определим как:

$$\zeta_{oi} = \mu \pm |\gamma_i|; \quad \alpha_{ex} = \frac{\mu + \gamma_{ex}}{2}, \quad (4)$$

где  $\gamma_i$  - угол, определяющий положение гибкого элемента в зоне контакта, град (на участке входа ворса в контакт – до оси  $X$  угол  $\gamma$  положительный, далее до выхода ворса из контакта - отрицательный).

Взаимосвязь рассмотренных геометрических параметров, с учетом исходных данных, позволяет получить уравнения координаты точки контакта в подвижной ( $x_{Li}$ ,  $y_{Li}$ ) и неподвижной ( $X_L$ ,  $Y_{Li}$ ) системах координат.

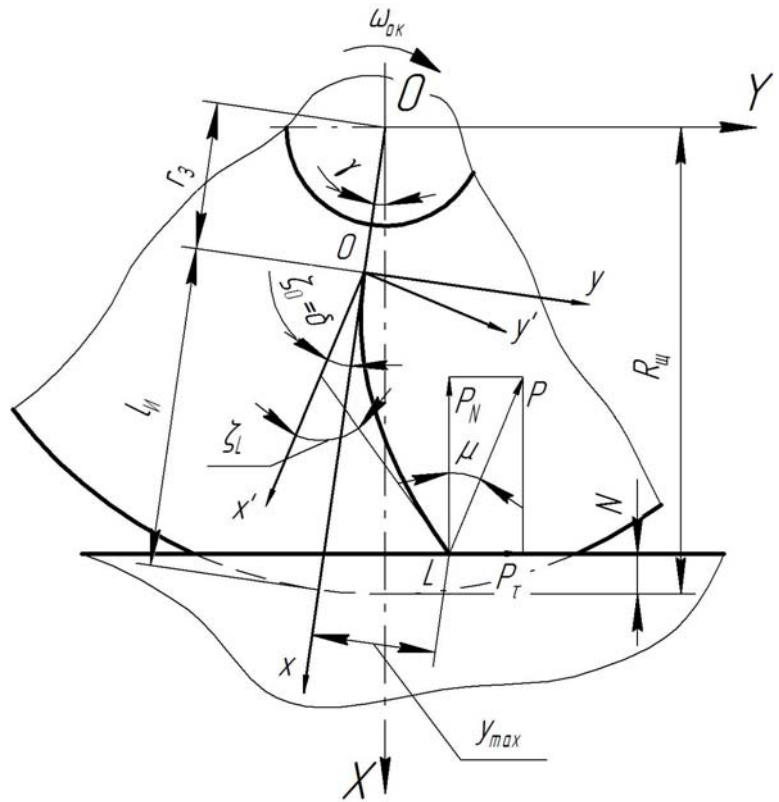


Рисунок 2 - Схема зоны контакта ворса с обрабатываемой поверхностью

Разработанная методика позволила посредством соответствующего алгоритма, представленного на рисунке 3, определять непосредственно величину силы возникающей в зоне контакта на всем её протяжении при скольжении ворса и максимальные напряжения, возникающие в гибких элементах.

$$P_{Li} = \beta^2 \frac{EJ}{l_H^2} g^4, \quad (5)$$

где  $g$  - коэффициент, учитывающий динамику вращения проволоочного инструмента;  $l_H$  - длина изгибающейся части проволоочки, мм;

$$\sigma_{\max i} = \frac{\omega_i}{\beta_i} \cdot P_{\max i} \cdot l_H \cdot \frac{d_g}{2J}, \quad (6)$$

где  $P_{\max i}$  - максимальная контактная сила, на участке скольжения ворса, Н;  $J$  - осевой момент инерции площади поперечного сечения, мм<sup>4</sup>.

На третьем этапе, была создана модель определения температуры основы обрабатываемой поверхности при скольжении сжато-изогнутого ворса, учитывающей неравномерное распределение площадок контакта по площади соприкосновения инструмента с обрабатываемым изделием и взаимовлияние локальных температур контактных площадок всех проволоочек инструмента  $n_{\theta\psi}$  на локальную температуру точечного источника  $\theta_\zeta$ :

$$\theta_\zeta = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_\psi \cdot S_1} \cdot \sum_{\psi=1}^{n_{\theta\psi}} \left( \frac{1}{\psi} \cdot \exp \left( -\frac{\zeta^2 \cdot \varepsilon_\eta}{4 \cdot \psi} \cdot Pe_S \right) \right), \quad (7)$$

где  $Q$  - мощность источника, Вт;  $\lambda_\psi$  - коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/(м·°С);  $\psi = x/S_1$ ,  $\zeta = y/S_2$  - безразмерные координаты;  $S_1$ ,  $S_2$  - шаги в продольном и поперечном направлениях соответственно, м;  $\varepsilon_\eta = S_2/S_1$  - коэффициент кратности шага.

Данная температура необходима при расчете средней температуры зоны контакта по стандартной методике А. Н. Резникова.

**В третьей главе** приводятся результаты экспериментально-аналитических исследований параметров зоны контакта.

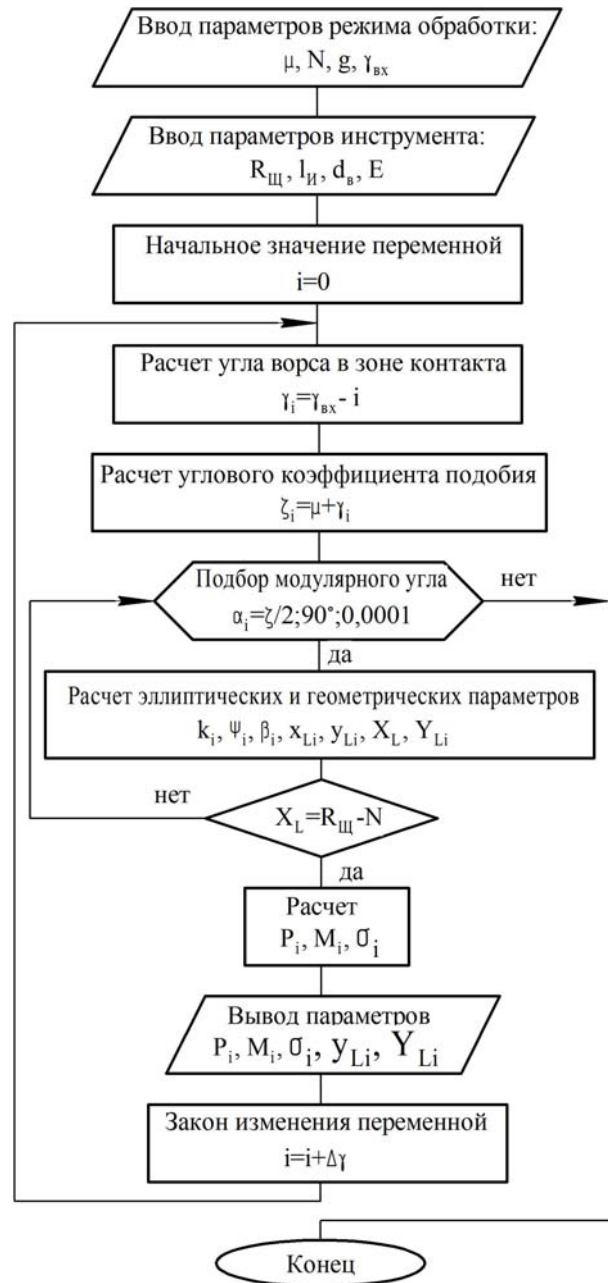


Рисунок 3 - Структурная схема алгоритма расчетно-аналитического метода определения параметров обработки на участке скольжения ворса

Расчет степеней покрытия поверхности отпечатками, формирующихся при ударах ворса гибкого инструмента на участке входа в контакт с обрабатываемым изделием подтвержден экспериментально снимками с микроскопа.

Это позволило провести расчеты по определению степени покрытия обрабатываемой поверхности отпечатками от ударов ворса как в площадь, равную площади собственного отпечатка, так и в площадь, равную площади упрочненной зоны (рисунок 4), как доли обрабатываемой площади, покрытой отпечатками хотя бы однократно, двукратно и т.д.  $P(a)$  и покрытой отпечатками определенное число раз  $P(a)^*$ .

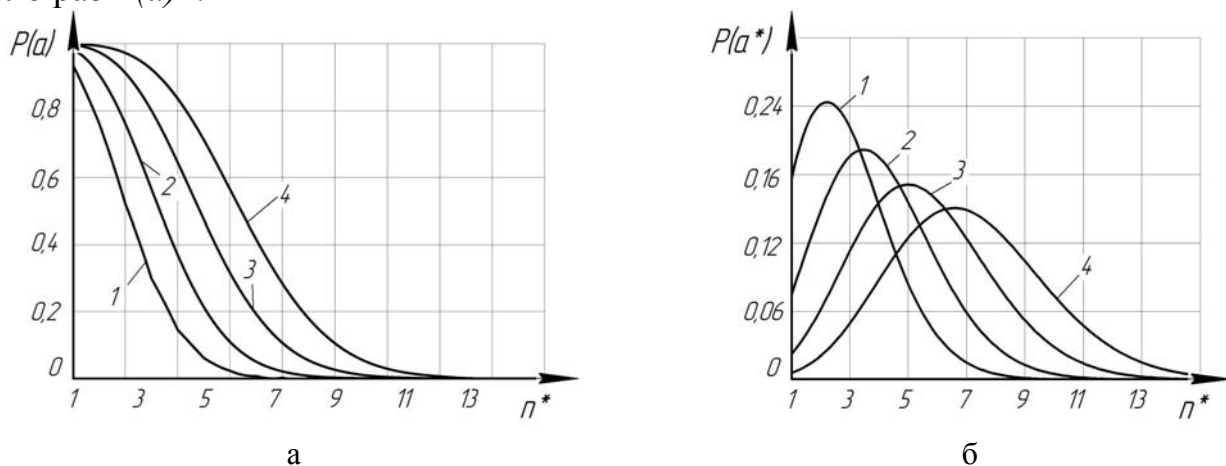
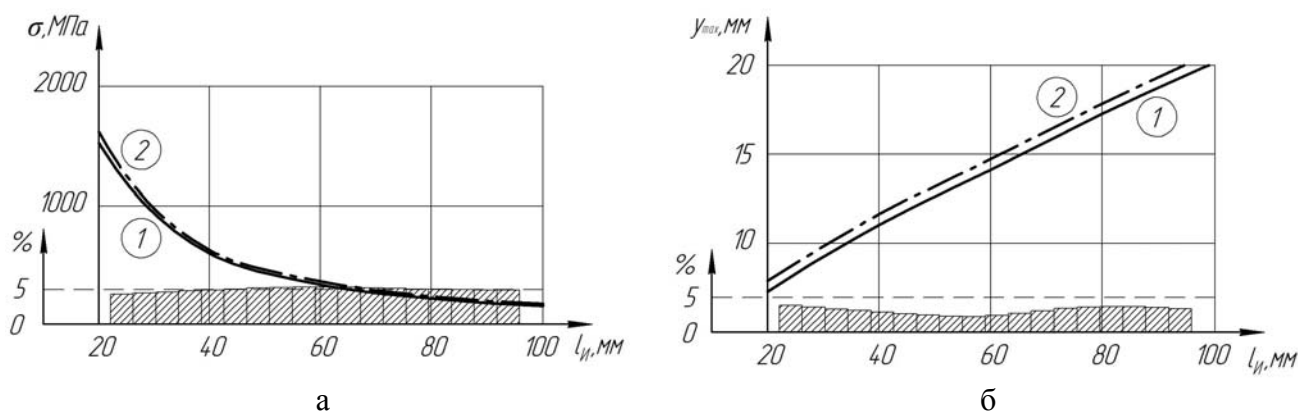


Рисунок 4 - Зависимость степеней покрытия  $P(a)$  (а) и  $P(a)^*$  (б) от количества попаданий в площадь, равную площади упрочненной зоны

Адекватность приведенных закономерностей при расчете параметров зоны контакта на участке скольжения ворса подтверждена видеосъемкой высокоскоростной камеры и моделированием в программе, реализующей метод конечно-элементного анализа (рисунок 5).



а - максимальные напряжения  $\sigma$  в ворсе при изменении длины изгибающейся части  $l_H$ ;  
 б - максимальные прогибы ворса  $y_{max}$  при изменении длины изгибающейся части  $l_H$ .

1 – данные, рассчитанные аналитически,  
 2 – данные моделирования в NX Advanced Simulation

Рисунок 5 - Сравнение результатов данных

На процентной оси показано расхождение расчетных и смоделированных значений, где наглядно видно, что максимальная разница значений при сравнении напряжений, возникающих в ворсе при его изгибе, составляет около 5 %, а при сравнении максимальных прогибов не превышает 4,7 %.

Анализ геометрических и силовых параметров зоны контакта показал, что максимальный прогиб ворса гибких элементов не зависит от вида плакируемого материала. В таблице 1 приведены расчетные данные для случая когда радиус заделки  $r_3 = 100$  мм, натяг  $N = 1,5$  мм, диаметр ворса  $d_g = 0,2$  мм.

Таблица 1 - Влияние углов трения на прогиб ворса

| Угол трения $\mu$ , град                                                                    |     | 7°    | 15°   | 33°   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-------|-------|-------|
| Максимальный прогиб $y_{max}$ , мм<br>при длине изгибающейся части<br>проволочки $l_H$ , мм | 25  | 8,32  | 8,35  | 8,39  |
|                                                                                             | 50  | 12,74 | 12,81 | 12,88 |
|                                                                                             | 75  | 16,56 | 16,66 | 16,76 |
|                                                                                             | 100 | 20,06 | 20,22 | 20,37 |

В то же время изменение угла трения оказывает довольно существенное влияние на силовые характеристики процесса плакирования, в частности на рисунке 6 представлена зависимость контактной силы по углам трения при изменении длины изгибающейся части проволочного ворса ( $P_{max(7)}$  - максимальная сила при плакировании AlTi10;  $P_{max(15)}$  - при обработке щеткой без нанесения покрытия;  $P_{max(33)}$  - при плакировании бронзой БрО5Ц5С5) при  $r_3 = 100$  мм,  $N = 1,5$  мм,  $d_g = 0,2$  мм.

Выявлено, что сила в зоне контакта продолжает возрастать еще некоторое время после достижения экстремума максимального прогиба, что хорошо видно на рисунке 7.

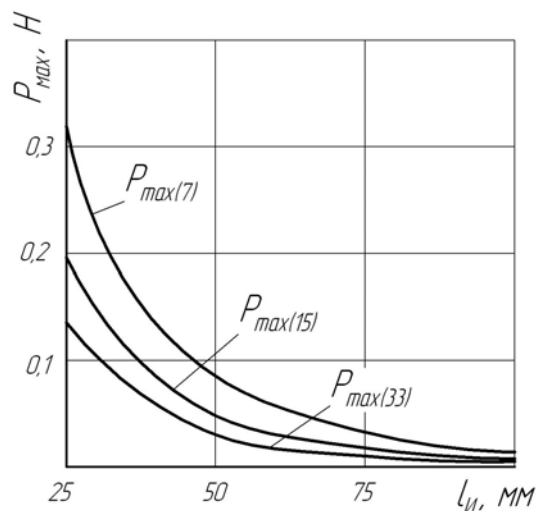
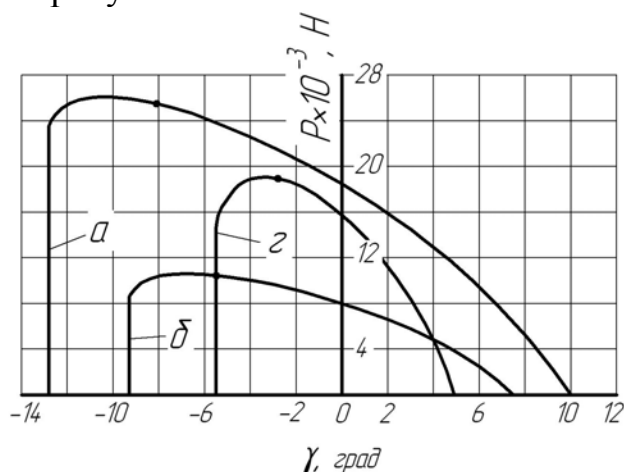


Рисунок 6 - Влияние длины изгибающейся части ворса  $l_H$  на изменение максимальной силы на участке контакта при скольжении  $P_{max}$



- - усилие, соответствующее наибольшему максимальному прогибу
- а - сила при  $r_3 = 50$  мм,  $N = 1,5$  мм,  $l_H = 50$  мм;
- б - при  $r_3 = 100$  мм,  $N = 1,5$  мм,  $l_H = 75$  мм;
- в - при  $r_3 = 100$  мм,  $N = 0,5$  мм,  $l_H = 50$  мм

Рисунок 7 - Распределение контактной силы  $P$  по длине зоны контакта, представленной углом  $\gamma_i$  ( $\mu = 33^\circ$ ;  $\eta_\phi = 0,2$ ;  $d_g = 0,2$  мм)

Рассмотрена оценка усталостной прочности ворса гибкого инструмента.

Адекватность модели расчета температуры в зоне контакта при скольжении сжато-изогнутого ворса подтверждена экспериментом, суть которого состояла в измерении распределенными по площади образца термопарами температуры поверхности основы обрабатываемого материала во время обработки проволочным инструментом.

Максимальные отклонения экспериментальных данных от расчетных составили от 5 % до 26 %, а несовпадение усредненных, по пяти замерам, значений – от 3 % до 16 %.

Разработана методика оценки режимных параметров процесса плакирования, с учетом модели расчета температуры основы поверхности обрабатываемого изделия, подтвержденной экспериментально измерением термопарами в процессе обработки, и адгезионной прочности сцепления покрытия с основой.

**В четвертой главе** проведено экспериментально-аналитическое исследование характеристик, обработанных плакированием гибким инструментом, поверхностей.

Получены регрессионные зависимости, позволяющие спрогнозировать износостойкость обработанных изделий, изготовленных из серого чугуна (СЧ20) с нанесенным покрытием из оловянной бронзы (БрО5Ц5С5) и получаемую толщину покрытия от технологических режимов процесса плакирования и параметров гибкого инструмента.

Выявлено, что при формируемой толщине покрытия  $h$  в диапазоне от 3,5 до 6 мкм износостойкость плакированных образцов, выраженная через коэффициент эффективности  $K_{эф}$ , в среднем в 3 раза выше по сравнению с необработанными ПГИ образцами ( $K_{эф} = 1$ ) (рисунок 8).

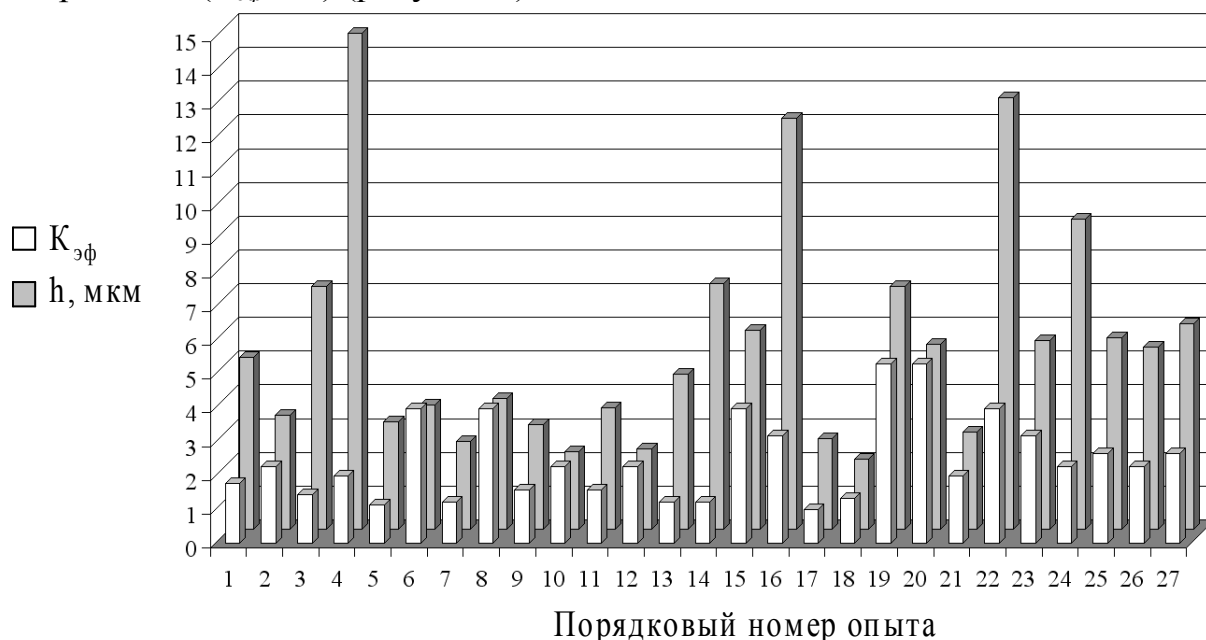


Рисунок 8 - Диаграмма результатов эксперимента: соотношение толщины покрытия  $h$  с коэффициентом эффективности  $K_{эф}$

Рентгеноспектральным микроанализом установлено, что материал покрытия и основы перемешивается, при этом наибольшее процентное содержание компонентов элемента материала покрытия приходится на внешний слой (порядка

90%); при снятии данных с основы образца процентное содержание покрытия составило порядка 25% (рисунок 9).

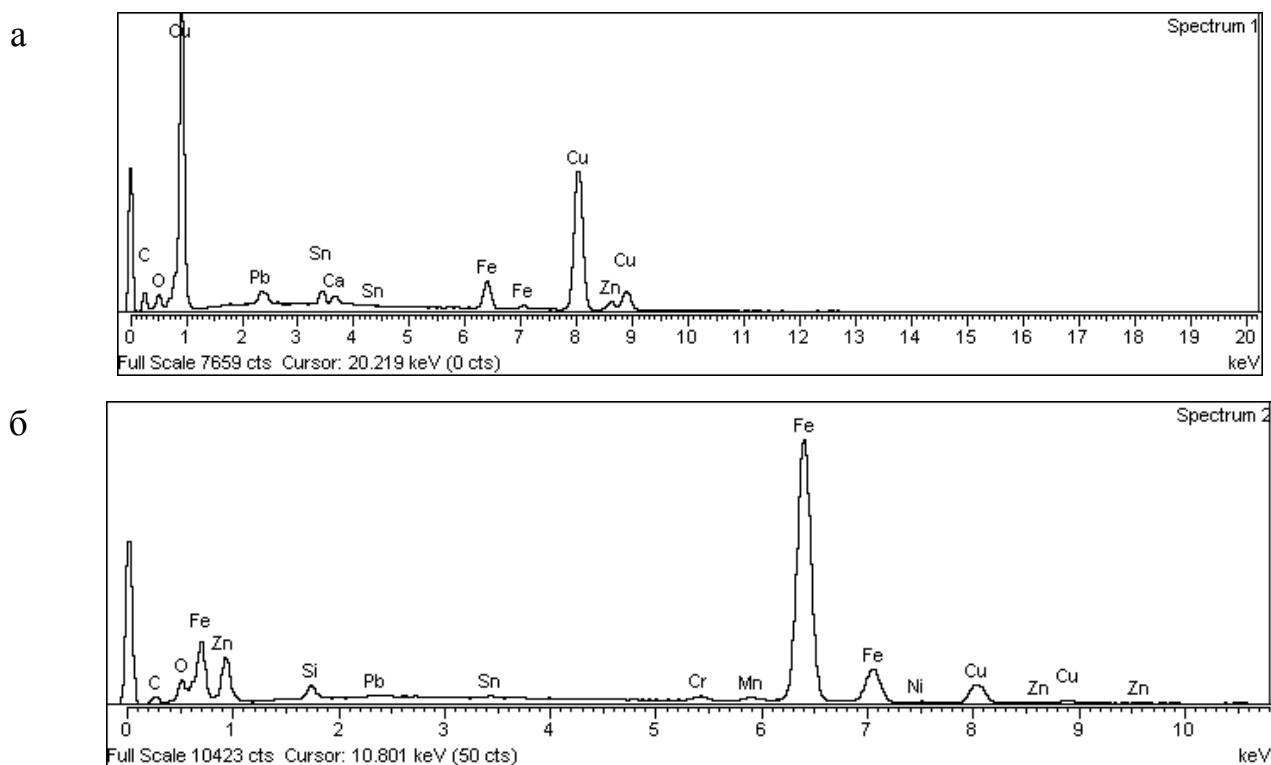


Рисунок 9 - Спектрограмма покрытия Бр05Ц5С5 на внешнем слое (а) и на основе образца (б)

Получена регрессионная зависимость определения относительной износостойкости изделий  $K_{\varepsilon}$  из незакаленного серого чугуна работающих в парах трения скольжения, подвергнутых условиям абразивного износа при возвратно-поступательном перемещении.

В качестве материала покрытия использовалась бронза Бр05Ц5С5, брусок которой прижимался к инструменту с усилием в 20-25 Н и поверх бронзы на самых мягких режимах наносился слой фторопласта Ф-4.

За эталон был принят износ пары трения СЧ 20 (190 НВ)/СЧ 20 (48-52 HRC).

$$K_{\varepsilon} = 2,48 - 0,2x_1 - 0,27x_3 - 0,5x_4 + 0,42x_1x_3 - 0,3x_4^2 \quad (8)$$

где  $x_i$  - коэффициент перехода от кодированных величин к натуральным:  $x_1 = (X1-48)/7$  - длина изгибающейся части ворса;  $x_2 = (X2-4)/2$  - количество проходов;  $x_3 = (X3-40)/10$  - окружная скорость инструмента;  $x_4 = (X4-20)/10$  - скорость перемещения изделия относительно инструмента.

Исследовано влияние параметров процесса плакирования на величину относительной износостойкости. Установлено, что на всех режимах в интервале варьирования относительная износостойкость показала приращение в 1,3-3,7 раза.

Разработан алгоритм выбора рациональных технологических параметров процесса, учитывающий специфику обработки, для формирования поверхностного слоя обрабатываемых изделий с требуемым уровнем эксплуатационных характеристик, структурная схема которого, приведена на рисунке 10.

Алгоритм построен с учетом: оценки долговечности проволочного инструмента по усталостной прочности ворса  $[\sigma_r]$  и числу циклов нагружения  $N_p$  до его

разрушения; анализа температуры основы поверхности обрабатываемого изделия  $\theta_o$ ; параметров зоны контакта инструмента с деталью при плакировании – температуры  $\theta_k$ , времени взаимодействия  $t_o$ , энергии механической активации  $E_k$  и коэффициента относительной прочности сцепления частиц  $K_\sigma$ .

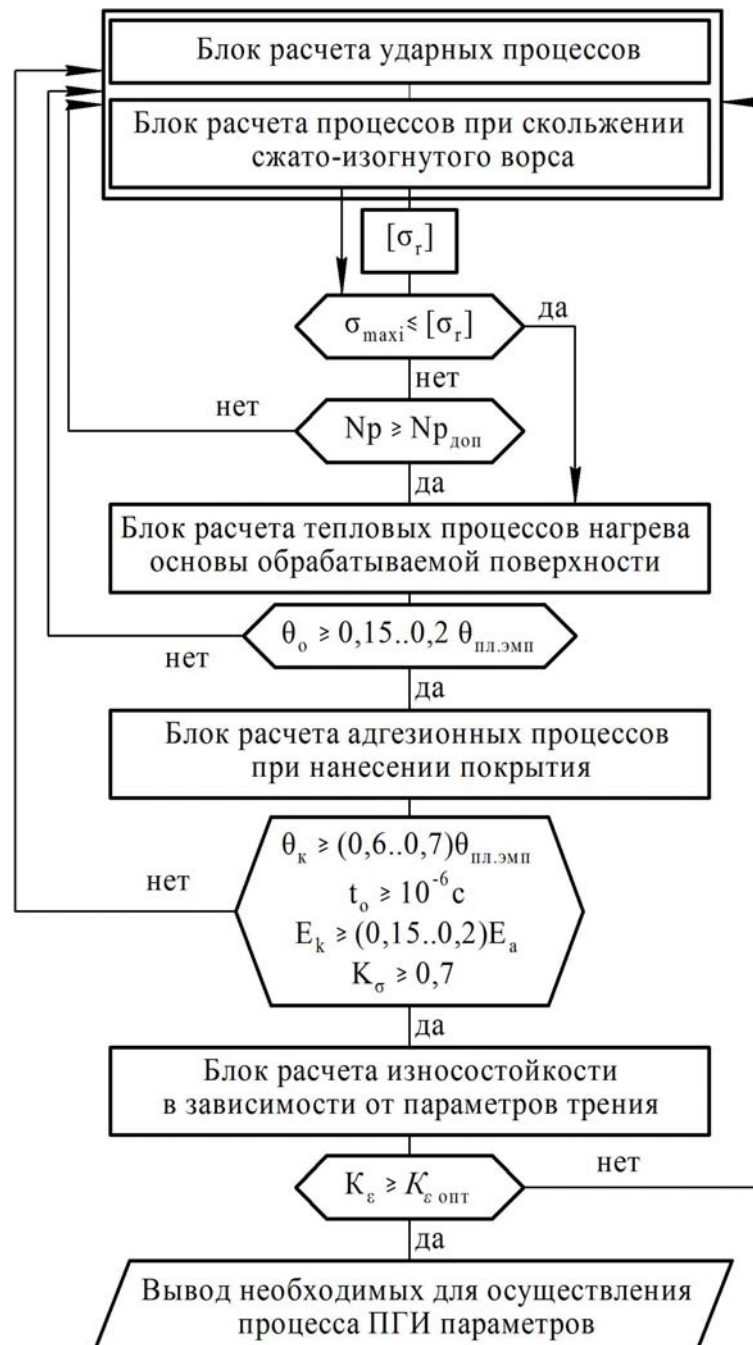


Рисунок 10 - Структурная схема алгоритма выбора рациональных режимов при плакировании гибким инструментом

Технология обработки направляющих скольжения смешанного трения металлорежущего оборудования методом плакирования гибким инструментом успешно используется при ремонтных работах на совместном предприятии ООО «ЛАДА ИНСТРУМЕНТ» - ОАО «АвтоВАЗ», которому была передана техническая документация на конструкцию плакирующей установки и типовая технология формирования поверхностных слоев нанесением износостойких покрытий.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Создан комплекс математических моделей, подтвержденный экспериментальными исследованиями, позволяющий производить:

- расчет степеней покрытия поверхности отпечатками, формирующихся при ударах ворса гибкого инструмента на участке входа в контакт с обрабатываемым изделием;

- расчет геометрических и энергосиловых параметров зоны контакта гибкого инструмента с обрабатываемым изделием на участке скольжения, основанный на точном решении дифференциального уравнения упругой линии методом эллиптических параметров;

- расчет средневероятной температуры основы обрабатываемой поверхности, учитывающей взаимовлияние локальных температур контактных площадок сжато-изогнутого ворса при его скольжении.

2. В результате исследований по разработанным моделям:

- проведена вероятностная оценка степени покрытия поверхности отпечатками и зонами пластической деформации;

- подтверждена адекватность приведенных закономерностей при расчете параметров зоны контакта на участке скольжения ворса моделированием в программе, реализующей метод конечно-элементного анализа;

- получена наглядная картина влияния режимов обработки и параметров гибкого инструмента на геометрические, энергосиловые характеристики процесса и тепловое состояние обрабатываемой поверхности.

3. Получены регрессионные зависимости, позволяющие спрогнозировать износостойкость обработанных изделий, изготовленных из серого чугуна (СЧ20) с нанесенным покрытием из оловянной бронзы (БрО5Ц5С5), получаемую толщину покрытия, относительную износостойкость от технологических режимов процесса плакирования и параметров гибкого инструмента.

Выявлено, что при формируемой толщине покрытия в диапазоне 3,5-6 мкм износостойкость в среднем повышается в 3 раза.

Исследовано влияние параметров процесса плакирования на величину относительной износостойкости. Установлено, что на всех режимах в интервалах варьирования, подобранных на основе экспериментально-аналитических исследований параметров зоны контакта, относительная износостойкость показала приращение в 1,3-3,7 раза.

4. Разработан алгоритм выбора рациональных технологических параметров процесса ПГИ, учитывающий специфику обработки, с целью формирования поверхностного слоя обрабатываемых изделий с требуемым уровнем эксплуатационных характеристик.

5. Технология обработки направляющих скольжения пар смешанного трения металлообрабатывающего оборудования внедрена на совместном предприятии ООО «ЛАДА ИНСТРУМЕНТ» - ОАО «АвтоВАЗ».

#### **4. СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

##### **Публикации в изданиях по перечню ВАК РФ и патенты на изобретение**

1. Зотов, А. В. Методика расчета геометрических и силовых параметров зоны контакта при плакировании изделий гибким инструментом / А. В. Зотов // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2012. – № 3. – С. 85-88.
2. Платов, С. И. Модель формирования толщины плакированного слоя на деталях пар трения технологического оборудования / С. И. Платов, Р. Р. Дема, А. В. Зотов // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2013. – №1. – С. 69-72.
3. Зотов, А.В. Оценка износостойкости направляющих скольжения, подвергнутых плакированию / А. В. Зотов, О. И. Драчев // Металлообработка. – 2013. – № 3. – С. 5-10.
4. Зотов, А. В. Анализ напряженного деформированного состояния ворса проволочного инструмента / А. В. Зотов, О. И. Драчев, Н. В. Семенченко // Известия Волгоградского государственного технического университета : межвуз. сб. науч. ст. – 2013. – № 20. – С. 21-23.
5. Зотов, А. В. Оценка деформационных процессов при обработке проволочным инструментом / А. В. Зотов, О. И. Драчев, Д. А. Расторгуев, А. В. Святкин, В. С. Климов, Е. Д. Мерсон // Металлообработка. – 2014. – №6. – С. 34-40.
6. Пат. 2360034 Российская Федерация, МПК С 23 С 24/02. Устройство для нанесения покрытий / Драчев О. И., Зотов А. В. ; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Тольяттинский государственный университет. – № 2007127977/02 ; заявл. 20.07.07 ; опубл. 27.06.09, Бюл. № 18. – 5 с. : ил.
7. Пат. 2360035 Российская Федерация, МПК С 23 С 24/02. Устройство для нанесения покрытий / Драчев О. И., Зотов А. В. ; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Тольяттинский государственный университет. – № 2007127978/02 ; заявл. 20.07.07 ; опубл. 27.06.09, Бюл. № 18. – 5 с. : ил.

##### **Публикации в других изданиях**

8. Зотов, А. В. Контроль и анализ температурных полей при плакировании изделий гибким инструментом / А. В. Зотов, Д. В. Гранченко // Инновация – 2008 : международная научно-практическая конференция. – Ташкент, 2008. – С. 228-229.
9. Драчев, О. И. Технология нанесения покрытий плакированием гибким инструментом на детали из серого чугуна / О. И. Драчев, А. В. Зотов // Управление инновациями : теория, инструменты, кадры. – СПб, 2009. – С. 119-121.
10. Зотов, А. В. Способ нанесения коррозионностойких покрытий на внутреннюю поверхность труб / А. В. Зотов, О. И. Драчев // Прогрессивные направления развития машино-приборостроительных отраслей и транспорта : междуна-

родная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. – Севастополь, 2009. – С. 107-109.

11. Зотов, А. В. Математическое моделирование расчета геометрических и энергосиловых параметров при деформационном плакировании / А. В. Зотов, О. И. Драчев // Перспективные технологии XXI века. В 2 книгах. К. 2 : монография / В. Н. Ардатов, Ю. В. Бахтина, П. П. Бескид и др. – Одесса, 2013. – Разд. 2.4. – С. 79–94.

12. Зотов, А. В. Стабилизация энергосиловых параметров при плакировании гибким инструментом / А. В. Зотов, Н. В. Семенченко // Механики XXI века : XII Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием. – Братск, 2013. – С. 126-128.

13. Зотов, А. В. Моделирование площади контакта при деформационной обработке / А. В. Зотов, Н. В. Семенченко, П. А. Огин // Сборник научных трудов SWorld. – 2013. – В. 3. – Т. 9. – С. 76-79.

14. Зотов, А. В. Влияние параметров проволочного инструмента на величину упругопластической деформации / А. В. Зотов // Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке : сб. матер. III Всероссийской научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием. – Ижевск, 2015. – С. 27-31.

15. Зотов, А. В. Тепловая модель при обработке проволочным инструментом / А. В. Зотов, Д. А. Расторгуев // Теплофизические и технологические аспекты повышения эффективности машиностроительного производства : труды IV международной научно-технической конференции. – Тольятти, 2015. – Ч.1. – С. 31-34.

16. Zotov, A. Selecting a material for pile wire tool / A. Zotov, N. Semenchenko // Pressing issues and priorities in development of the scientific and technological complex: research articles. – San Francisco, 2013. – С. 113-116.

*Автореферат*

**Зотов** Алексей Викторович

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ  
ПАР СМЕШАННОГО ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ  
ПУТЕМ ПЛАКИРОВАНИЯ ГИБКИМ ИНСТРУМЕНТОМ

Подписано в печать \_\_\_\_\_.\_\_\_\_\_.2015. Формат 60×84 1/16.

Усл. печ. л. \_\_\_\_\_. Тираж 100 экз. Заказ \_\_\_\_\_

Тольяттинский государственный университет  
445667, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14