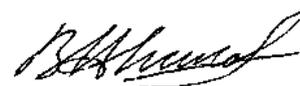


На правах рукописи



Новиков Виталий Иванович

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СЛОЖНО-  
ПРОФИЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ МЕТОДОМ  
ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОГО ПОЛИРОВАНИЯ.

Специальность 05.02.07 – «Технология и оборудование механической и  
физико-технической обработки»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание  
учёной степени кандидата технических наук.

Санкт-Петербург - 2010

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Ушомирская Людмила Алексеевна

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Васильков Дмитрий Витальевич;

кандидат технических наук, профессор  
Жуков Эдуард Леонидович.

Ведущая организация: ОАО «Завод Двигатель» (г. Санкт-Петербург)

Защита состоится 21 декабря 2010 года в 18<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.26 в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д.29, корпус 1, аудитория 41.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан “\_\_\_” ноября 2010 года

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.229.26  
д.т.н., проф.



Ушомирская Л.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Обеспечение эффективности изготовления конкурентоспособной по основным показателям надежности и долговечности продукции в настоящее время может быть получено за счет постоянного совершенствования технологии обработки заготовок, в том числе технологии финишной обработки. Для получения требуемого качества поверхностного слоя деталей, имеющих наружные сложнопрофильные поверхности, существует целый ряд различных методов обработки, в том числе электрохимическое, химическое, механическое полирования, однако, получить заданную шероховатость поверхности трудоемко, дорогостояще, а зачастую затруднительно, особенно используя экологически чистые методы обработки материалов. В этом отношении электролитно-плазменное полирование (ЭПП) является высокоэффективным процессом обработки изделий из токопроводящих материалов в нетоксичных средах, имеющий более высокие экологические и экономические показатели. Наиболее близким, по получаемым параметрам качества обрабатываемой поверхности и технологическому оснащению, к ЭПП является электрохимическое полирование, но в отличие от него, в электролитно-плазменной технологии используются экологически безопасные водные солевые растворы, которые в несколько раз дешевле токсичных кислотных компонентов. Однако, отсутствие в литературе зависимостей изменения качества обрабатываемой поверхности от параметров процесса ЭПП, моделей распределения температуры в поверхностных слоях заготовки и диапазона рациональных режимов обработки легированных сталей затрудняет разработку технологических процессов с применением метода ЭПП и установлении режимов работы оборудования.

**Цель и задачи работы.** Целью работы является повышение производительности полирования сложнопрофильных поверхностей заготовок, обеспечивающие требуемое качество поверхностного слоя методом электролитно-плазменного полирования за счет установления взаимосвязей параметров процесса.

Поставленная цель может быть достигнута посредством решения следующих основных задач:

1. Определить состав газовой анодной оболочки, образующейся при ЭПП вокруг обрабатываемой поверхности, позволяющий оценить физическую модель съема материала с анода-заготовки.
2. Разработать математическую модель влияния разрядного источника тепла на изменения в поверхностном слое металла заготовки с учетом зависимостей параметров процесса.
3. Создать целенаправленное формирование параметров качества (уровня шероховатости, структуры, микротвердости, остаточных напряжений) поверхностного слоя сложнопрофильной детали, обрабатываемой методом электролитно-плазменного полирования при рациональных режимах процесса.

4. Установить закономерности взаимосвязей параметров ЭПП с производительностью обработки сложнопрофильных поверхностей при условии получения требуемого качества обрабатываемой поверхности.

5. Разработать на основании полученных взаимосвязей параметров ЭПП оптимизационную модель управляющих параметров процесса, выявляющую рациональные режимы и определяющую заданную шероховатость поверхности. Проведение проверочных промышленных испытаний ЭПП деталей с наружными сложными поверхностями.

**Методологическая основа исследований.** Теоретические и экспериментальные исследования ЭПП базировались на научных положениях теории теплофизики для твердых, жидких и газообразных сред, с использованием математического аппарата, современной вычислительной, измерительной, регистрирующей и анализирующей аппаратуры и оригинальных методик, в том числе по спектральному анализу ГАО и калориметрированию тепловых потоков при ЭПП. Исследование параметров шероховатости проводились с помощью профилометра MarSurf PS1 (Германия); измерение остаточных напряжений в поверхностных слоях заготовок – методом неразрушающего контроля на аппаратуре СИТОН-ТЕСТ (Россия); для исследования поверхностных слоев в работе использован металлографический комплекс Axio Observer Z1m (Германия); микротвердость в локальных объемах поверхностного слоя измеряли по ГОСТ 9450-76 на микротвердомере MicroMet 5103 (Германия); изучение молекулярного (ионного) состава газовой анодной оболочки проводилось на спектрографе ФЭУ-14. Эксперименты проводились по многофакторным планам, а полученные результаты обрабатывались вероятностно-статистическими методами с использованием программы MathCAD 14. Математическое моделирование проводилось на базе программного пакета для конечно-элементного моделирования ANSYS 11, а также оригинальной программы, написанной на языке программирования Visual Basic, реализующей оптимизационную модель ЭПП. Теоретические положения работы подтверждены достоверными данными, полученными в лабораторных условиях.

**Новые научные результаты.** К основным научным результатам, полученным впервые и защищаемых автором, относятся:

1. Установлен состав газовой анодной оболочки (ГАО), образующейся вокруг обрабатываемой поверхности.

2. Разработана математическая модель распределения температурного поля в поверхностных слоях металла обрабатываемой детали при разрядом воздействии ГАО, прогнозирующая наличие двух подвижных фаз с температурами выше температуры кипения и плавления, а также фазы твердого тела с наличием отпущенного слоя материала, что подтверждается проведенным исследованием топографии обработанной ЭПП поверхности, выявившим наличие лунок диаметром порядка 0,6-0,8 мкм.

3. Выявлена квадратичная закономерность влияния таких параметров ЭПП как величина рабочего напряжения, концентрация

электролита и время обработки на уровень шероховатости обрабатываемой поверхности, одновременно процесс ЭПП не влияет на структуру полируемой поверхности. Влияние на уровни микротвердости и остаточных напряжений составляет не более 10%.

4. Установлены линейные закономерности взаимосвязи величины рабочего напряжения, концентрации электролита и времени обработки с производительностью полирования сложнопрофильных поверхностей. Получено повышение производительности в 2 раза.

5. Проведена оптимизация процесса ЭПП по себестоимости и производительности обработки, определен диапазон рациональных режимов обработки легированных сталей.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

– конечно-элементная модель распределения температурного поля в поверхностных слоях металла обрабатываемой детали;

– эмпирическая модель целенаправленного снижения уровня шероховатости и формирования качества поверхностного слоя обрабатываемой детали с учетом параметров процесса полирования;

– модель оптимизации процесса ЭПП и алгоритм выбора рациональных режимов полирования легированных сталей, основанные на предлагаемых экспериментальных зависимостях;

– полученные результаты теоретических и экспериментальных исследований на основе предложенных моделей и испытаний в производственных условиях.

**Практическая ценность.** Разработанный процесс электролитно-плазменного полирования сложных поверхностей деталей из легированных сталей типа «Турбинная лопатка», «Лопасть», «Лопатка водомета» позволяет обеспечить высокую производительность финишной обработки поверхностного слоя и повысить производительность в 2 раза по сравнению с методом электрохимического полирования.

Построенная оптимизационная модель процесса ЭПП выявила диапазоны рациональных режимов обработки деталей из легированных сталей. Выполненные производственные испытания подтвердили результаты проведенных исследований.

Использование метода электролитно-плазменного полирования расширяет возможности финишной обработки сложнопрофильных деталей, т.к. позволяет, сохраняя качество поверхности, обрабатывать сложные поверхности деталей из легированных сталей, за существенно меньшее время обработки.

Материалы диссертации внедрены в учебный процесс и использованы при подготовке профилирующих дисциплин на ММФ ГОУ ВПО «СПбГПУ».

**Личный вклад автора** состоит в совместных с научным руководителем постановке задач диссертации, а также проведении научных экспериментов, обработке полученных результатов, формулировке выводов и положений, выносимых на защиту, написании статей по теме и самой диссертационной работы.

**Апробация работы.** Результаты диссертационной работы обсуждались в период с 2004-2009 гг. на ряде научно-технических конференций: XXXIII Неделя науки СПбГПУ. Межвузовская научно-техническая конференция (Санкт-Петербург, 2004); XXXV Неделя Науки СПбГПУ: Всероссийская межвузовская научно-технической конференция студентов и аспирантов (Санкт-Петербург, 2005-2008); XXXVIII международная научно-практическая конференция «Неделя науки СПбГПУ» (Санкт-Петербург, 2009); докладывались на расширенных заседаниях кафедры «Технология конструкционных материалов и материаловедения» ММФ СПбГПУ (Санкт-Петербург, 2005-2010)

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 10 работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ.

В работах, опубликованных в соавторстве и приведенных в конце автореферата, лично соискателю принадлежат: [1], [5], [6] – обоснование целесообразности использования предложенного метода для обработки сложных поверхностей деталей из легированных сталей; [2] – математическая модель влияния теплового источника на обрабатываемую поверхность; [3], [4], [8], [9] – анализ и установление связей технологических режимов с параметрами качества обработанной поверхности; [7] – обоснование структуры оборудования; [10] – разработка модели оптимизации и выявления рациональных режимов обработки деталей из легированных сталей.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографии из 97 наименований и содержит 148 машинописных страниц основного текста, 82 рисунка, 21 таблицу и 9 приложений, которые подтверждают работоспособность разработанных моделей и эффективность предложенных решений.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** показана актуальность работы, сформулированы цель и задачи диссертационного исследования; раскрыта его научная новизна и практическая значимость; представлены основные положения, выносимые на защиту; кратко описана структура работы.

**Первая глава** носит обзорный характер и раскрывает современное состояние вопроса по финишной обработке сложнопрофильных поверхностей. Различным аспектам решения задач исследования процессов, возникающих на границе металл-электролит посвящены работы И.Я. Ясногородского, В.С. Мураса, В.Д. Сапрыкина, Б.Р. Лазаренко, С.П. Фурсова, А.С. Парасаданяна, В.Н. Дураджи, В.В. Баковец, П.Н. Белкина, В.И. Ганчара, Б.П. Саушкина, Н.А. Амирхановой, Р.А. Мирзоева, Ушомирской Л.А., Веселовского А.П. и др. Рассматриваются физико-химические основы электролитно-плазменной обработки (ЭПО). Приведены основные условия проведения процесса электролитно-плазменного

полирования. В литературных источниках рассматривались модели прианодной зоны, а также для оценки проводимости парогазовой анодной оболочки и расчета теплового потока из неё в электролит, составы электролитов для полирования различных сталей, однако, остается не исследованным состояние газовой оболочки. Имеются данные по анодному нагреву и его влиянию на фазовый состав поверхности, но эти модели и расчеты рассматривали процесс электролитно-плазменной обработки с точки зрения химико-термического воздействия на обрабатываемый материал, когда площадь катода соразмерна или меньше площади анода и температура его достигает температуры плавления стали или рекристаллизации. Для электролитно-плазменного полирования характерно значительное превосходство площади катода над площадью анода. По имеющейся информации, для случая, когда площадь поверхности катода много больше площади поверхности анода, нет данных о зависимостях, позволяющих формировать требуемое качество обработанной поверхности, что не позволяет эффективно применять метод электролитно-плазменного полирования, также отсутствуют данные о полном спектре основных параметров, определяющих качество поверхностного слоя и сведения о рациональных режимах обработки легированных сталей. Выявлено отсутствие количественных характеристик передачи энергии в анод-заготовку и состава газовой анодной оболочки. Экспериментальные исследования электролитной плазмы являются важным и сложным объектом исследований. Сложность проведения измерений связана с интенсивностью процессов теплообмена и высокой степенью концентрации энергии. Процессы, протекающие при ЭПП, характеризуются значительным градиентом температуры, что существенно ограничивает применение существующих экспериментальных исследований ввиду значительной погрешности при обработке экспериментальных результатов.

**Во второй главе** содержится описание используемых в работе оборудования, материалов и методов исследования поверхностных слоев детали после ЭПП.

Экспериментальное исследование отдельных процессов производилось с применением оригинальных методик и современного оборудования: исследование параметров шероховатости проводилось с помощью профилометра MarSurf PS1 (Германия); измерение остаточных напряжений в поверхностных слоях заготовок - методом неразрушающего контроля на аппаратуре СИТОН-ТЕСТ (Россия); для исследования поверхностных слоев в работе использован металлографический комплекс Axio Observer Z1m (Германия); микротвердость в локальных объемах поверхностного слоя измеряли по ГОСТ 9450-76 на микротвердомере MicroMet 5103 (Германия); изучение молекулярного (ионного) состава газовой анодной оболочки проводилось на спектрографе ФЭУ-14. Эксперименты проводились по многофакторным планам, а полученные результаты обрабатывались вероятностно-статистическими методами с использованием программы MathCAD 14. Математическое моделирование проводилось на базе

программного пакета для конечно-элементного моделирования ANSYS 11, а также оригинальной программы, написанной на языке программирования Visual Basic, реализующей оптимизационную модель ЭПП.

**В третьей главе** рассмотрены газовая анодная оболочка (ГАО), образующаяся при обработке вокруг анода-заготовки, и тепловые потоки, существующие при ЭПП.

Наличие определенных спектральных линий говорит о присутствии в газе конкретного атома, длины волн могут быть представлены формулой:

$$\lambda = \lambda_{\infty} \cdot n^2 / (n^2 - 4),$$

где  $\lambda_{\infty}$  – некоторая постоянная, а  $n$  принимает значения последовательного целого ряда чисел.

Спектральное исследование в водном растворе сернокислых натрия и калия показало, что газовая область состоит из смеси ионов кислорода и водорода и катионов щелочных металлов (натрия и калия), т.е. получены спектрограммы составляющих ее элементов (рис. 1), из которых видно, что на определенной длине волны (ось абсцисс) происходит излучение при возбуждении соответствующего атома.

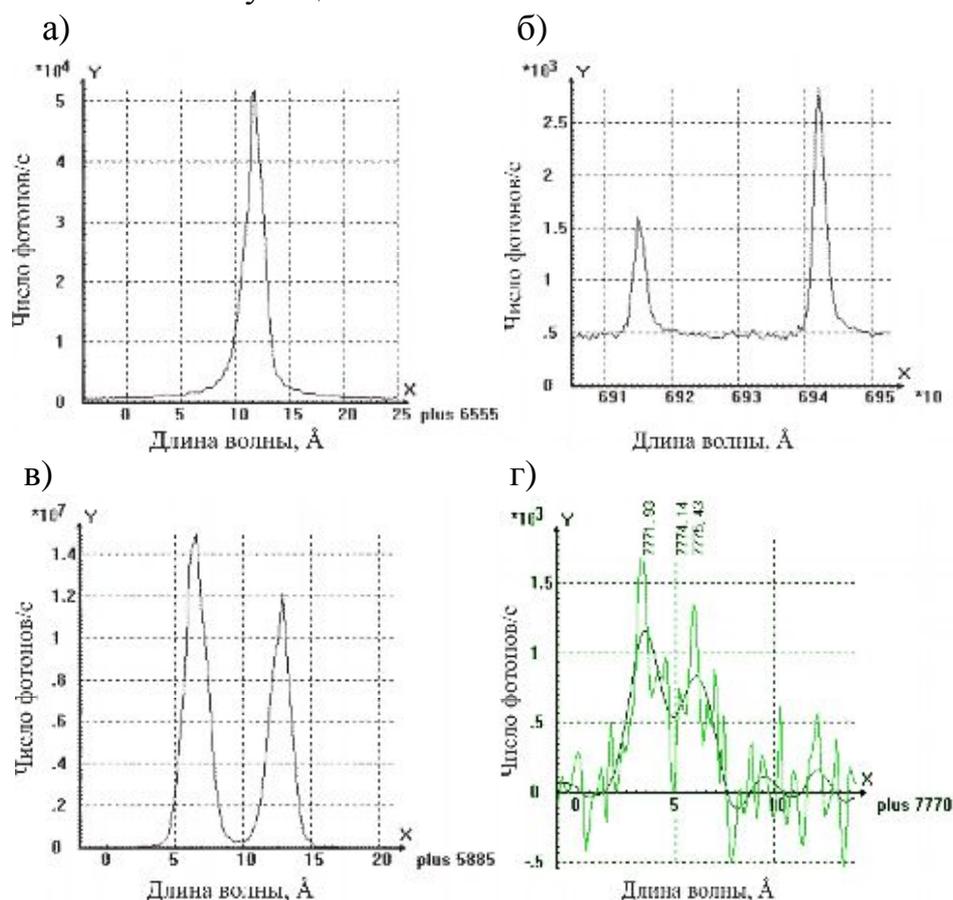


Рис. 1. Спектрограммы выявленных атомов:  
а – водорода; б – калия; в – натрия; г – кислорода

Наличие определенных элементов в составе ГАО позволило подтвердить теорию о преобладании разрядного механизма съема материала

в физической модели ЭПП, поскольку присутствие других атомов и молекул (анионов соли, гидроксидов и др.), присущих электрохимическим реакциям не выявлено.

На основании экспериментов по калориметрированию тепловых потоков из ГАО в анод-заготовку и электролит, а также проведенных расчетов теплового баланса процесса ЭПП построена, конечно-элементная модель распределения теплового поля при воздействии разряда на поверхность заготовки. Для чего была рассчитана мощность одного разряда, воздействующего на вершину гребешков шероховатости обработанной поверхности. Энергию разряда можно определить из уравнения баланса энергии:

$$W_{\text{разряд}} = w_{\text{разряд}} \cdot S = (w_{\text{ГАО}} - q_{\text{ГАО-анод}} - q_{\text{ГАО-жидкость}}) \cdot S, \quad (1)$$

где  $w_{\text{разряд}}$  – плотность энергии разряда, Вт/м<sup>2</sup>;  $q_{\text{ГАО-анод}}$  – плотность теплового потока в заготовку-анод (данная величина была определена экспериментально в процессе калориметрирования и составляет 38000 Вт/м<sup>2</sup>);  $q_{\text{ГАО-жидкость}}$  – плотность теплового потока в электролит, Вт/м<sup>2</sup>;  $w_{\text{ГАО}}$  – плотность энергии в газовой анодной оболочке, Вт/м<sup>2</sup>;  $S$  – обрабатываемая площадь, м<sup>2</sup>.

При электролитно-плазменном полировании газовую анодную оболочку можно рассматривать как пленочное кипение жидкости на поверхности металлического анода. Плотность теплового потока при пленочном кипении можно оценить по формуле:

$$q_{\text{ГАО-жидкость}} = \alpha \cdot (t_n - t_{\text{ж}}), \quad (2)$$

где  $t_n$  – температура газовой анодной оболочки, °С;  $t_{\text{ж}}$  – температура жидкости, °С;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·°С).

Температура газовой анодной оболочки принимается равной температуре анода, исходя из теплового равновесия между анодом и оболочкой. Из проведенного эксперимента температура анода составляет 112°С, температура электролита – 95°С. Коэффициент  $\alpha$  находится из выражения:

$$\alpha = Nu \cdot \lambda_{\text{ж}} / X, \quad (3)$$

где  $Nu$  – число Нуссельта;  $X$  – характеристическая длина анода, м;  $\lambda_{\text{ж}}$  – коэффициент теплопроводности жидкости, Вт/(м·°С).

$$Nu = 0,25 \cdot [(X^3 \cdot \rho_{\text{пар}} \cdot (\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{пар}}) \cdot g \cdot C_{p,\text{пар}}) / \mu_{\text{пар}} \cdot \lambda_{\text{пар}}]^{1/3}, \quad (4)$$

где  $\rho_{\text{пар}}=0,5863$  – плотность пара, кг/м<sup>3</sup>;  $g=9,8$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\rho_{\text{ж}}=970,5$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $C_{p,\text{пар}}=2060$  – удельная теплоемкость пара, Дж/(кг·°С);  $\mu_{\text{пар}}=1,27 \cdot 10^{-5}$  – динамическая вязкость пара, Н·с/м<sup>2</sup>;  $\lambda_{\text{пар}}=0,0246$  – коэффициент теплопроводности пара, Вт/(м·°С).

Плотность энергии в парогазовой оболочке равна:

$$w_{ГАО} = W_{ГАО} / S = R_{ГАО} \cdot I^2 / S, \quad (5)$$

где  $R_{ГАО}$  – сопротивление газовой анодной оболочки, Ом;  $I$  – сила тока, А.  
Тогда с учетом (2) – (5) выражение (1) принимает значение:

$$W_{\text{разряд}} = 227 \text{ Вт}$$

Основываясь на профилограмме поверхности до полирования, создана конечно-элементная модель обрабатываемой поверхности размером (0,1x0,8) мм<sup>2</sup>, в самой верхней точке которой приложена рассчитанная мощность разряда. Размер конечно-элементной сетки изменяется от 0,01 мм в основании до 0,00005 мм на профиле шероховатости.

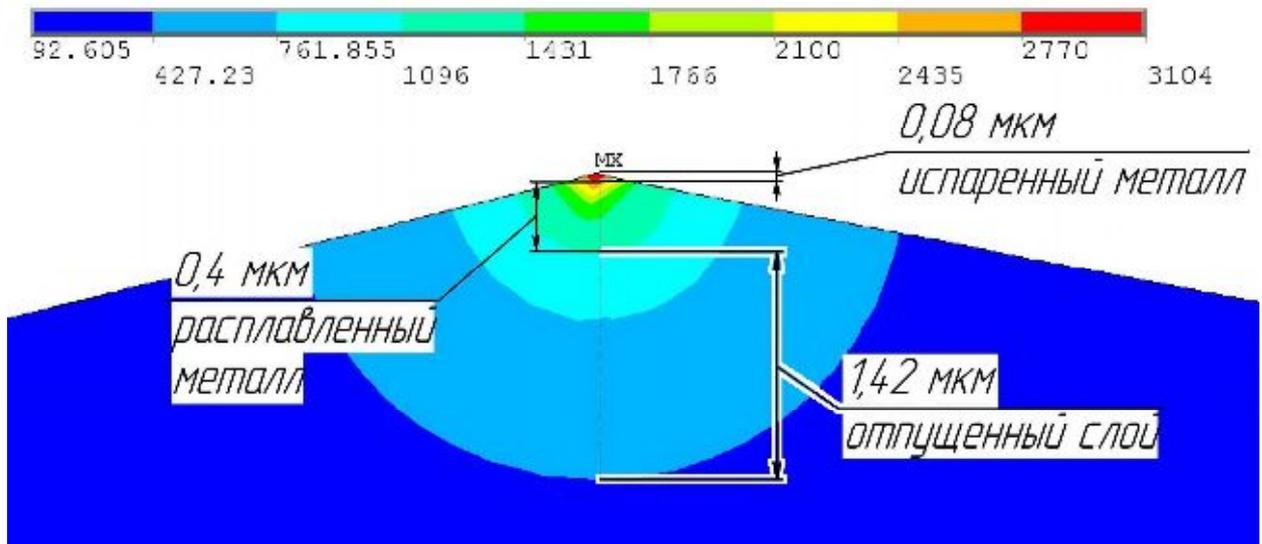


Рис. 2. Распределение теплового поля в обработанной поверхности

Распределение температуры в поверхности (рис. 2), полученное с помощью программы конечно-элементного моделирования ANSYS 11, показало, что значение температуры в поверхности изменяется от температуры 3100°С до 92°С, то есть за время  $10^{-6}$ - $10^{-4}$  с существует три температурные зоны: выше 2800°С – испарение, от 2800-1400°С – жидкая фаза и ниже 1400°С – твердое тело. Таким образом, 0,08 мкм - это испаренный металл, 0,4 мкм – расплавленный и 1,42 мкм – отпущенный слой материала, вследствие чего наблюдается 10% изменение микротвердости полированного материала. Данные модели подтверждаются, полученными на атомно-силовом сканирующем зондовом микроскопе Solver P47-PRO, снимками поверхности образца из стали 12Х18Н10Т после ЭПП (обработка производилась в течении 30 секунд в водном растворе сернокислого натрия концентрацией 0,2 моль/л при напряжении 300 В). На полированной поверхности (рис. 3 выноска А) явно прослеживается наличие лунок, диаметром порядка 0,6-0,8 мкм, от разрядного воздействия. Рассчитанное по построенной модели время, необходимое для достижения шероховатости  $Ra=0,14$  мкм, составляет порядка 175 с, а экспериментальное время – 190 с, что подтверждает адекватность модели.

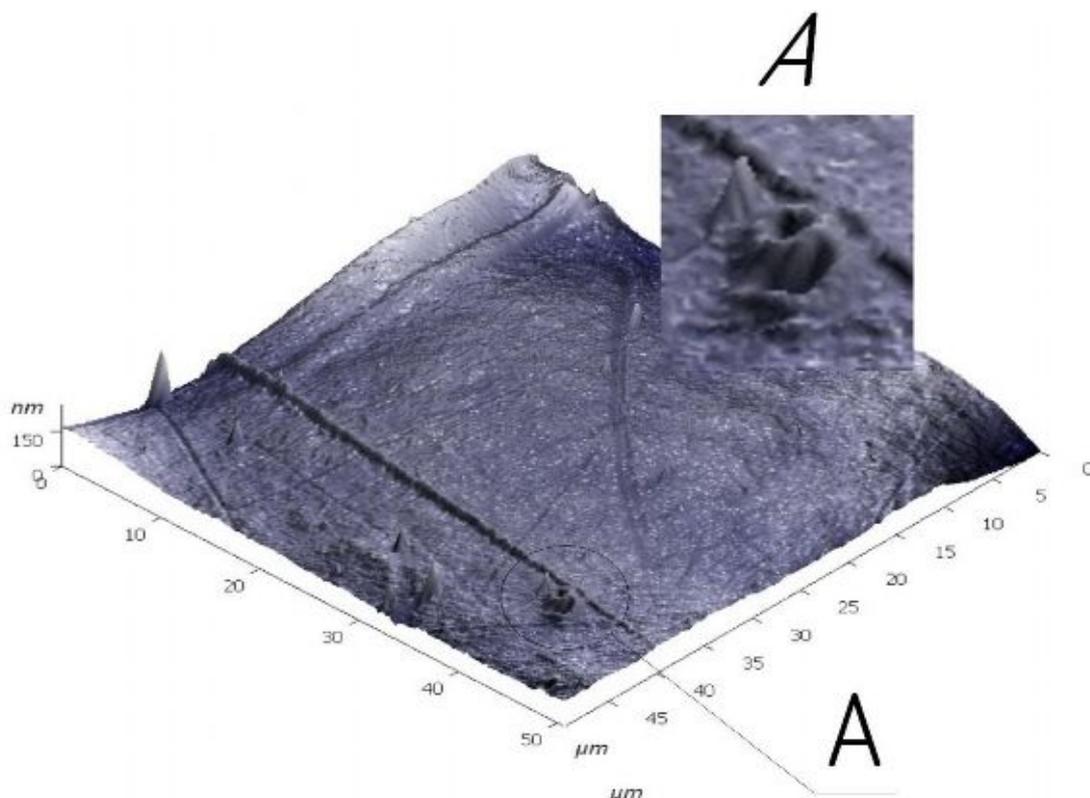


Рис. 3. Топография поверхности после ЭПП

**В четвертой главе** представлены результаты исследований качества поверхности, образующейся в результате ЭПП. Построена эмпирическая модель зависимости величины шероховатости  $Ra$  обработанной поверхности от параметров процесса ЭПП. Для построения данной модели был спланирован и реализован многофакторный эксперимент. В качестве образцов использовались элементы лопасти гребного винта из стали 30ХГСА. Исходя из проведенных однофакторных экспериментов, влияющими факторами на технологические показатели обработки, были выбраны следующие: концентрация электролита  $n$ , моль/л; время обработки  $\tau$ , мин; величина рабочего напряжения  $U$ , В в диапазонах:  $n = 0,1-0,5$  моль/л;  $\tau = 3-9$  мин;  $U = 240-360$  В. Полученный регрессионный полином зависимости  $Ra$  от параметров процесса выглядит следующим образом:

$$Ra(U, n, \tau) = 0,931 + 1,36 \cdot n + 0,028 \cdot \tau + 1,5 \cdot n^2 + 1,4 \cdot 10^{-3} \cdot U \cdot n \cdot \tau + 1,2 \cdot 10^{-5} \cdot U^2 - 6,2 \cdot 10^{-3} \cdot U \cdot n - 4,2 \cdot 10^{-4} \cdot U \cdot \tau - 5 \cdot 10^{-3} \cdot U + 3,3 \cdot 10^{-3} \cdot \tau^2$$

Исследования показали, что параметр шероховатости  $Ra$  уменьшается ( $Ra=0,17$  мкм) как с ростом величины рабочего напряжения от 240 В до 306 В, так и с увеличением концентрации электролита от 0,1 моль/л до 0,23 моль/л (что видно из графиков, представленных на рис. 4 а, б, в).

Дальнейшее увеличение напряжения и концентрации (на участке 306-360 В и 0,23-0,5 моль/л) приводит к увеличению величины шероховатости ( $Ra=0,39$  мкм), поскольку происходит изменение топографии обрабатываемой поверхности, образуется новый ландшафт поверхности со

своим уровнем шероховатости, то есть для дальнейшего снижения шероховатости необходимо обработать большее количество вершин неровностей. Увеличение времени обработки также ведет к уменьшению шероховатости, однако, эффективность полирования снижается, то есть за единицу времени снимается меньший слой материала, поскольку частота следования разрядов остается постоянной для одной и той же обрабатываемой площади поверхности.

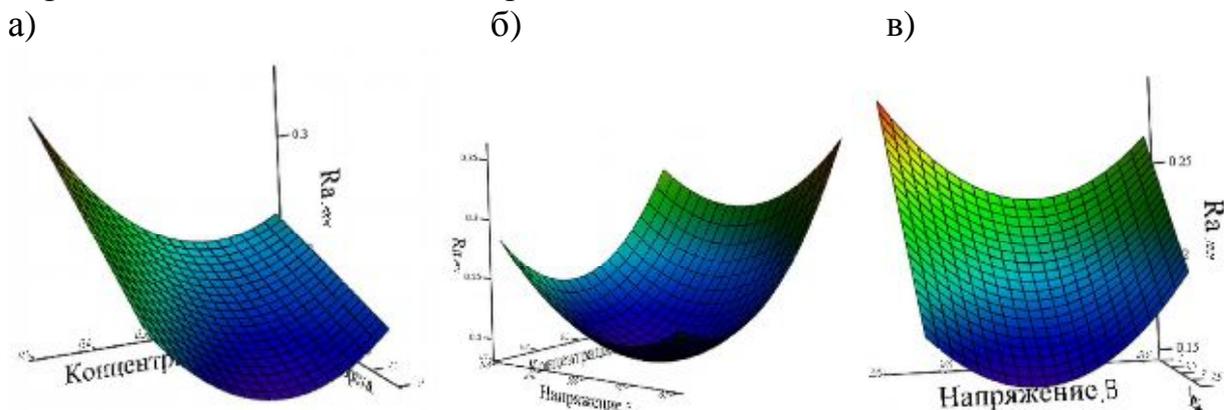


Рис. 4. Зависимость величины  $Ra$  от параметров процесса ЭПП:  
 а)  $Ra=f(n, \tau)$ ; б)  $Ra=f(n, U)$ ; в)  $Ra=f(U, \tau)$

Исследовалось влияние ЭПП и на такие параметры качества поверхности как уровень остаточных напряжений, структуру и микротвердость поверхности после обработки. Результаты определения остаточных напряжений поверхностного слоя образцов из стали 30ХГСА приведены на рис. 5.

В приповерхностной зоне наблюдаются напряжения сжатия порядка 70 МПа на глубине 6 мкм от поверхности, однако, их уровень в зависимости от параметров обработки (концентрация электролита, рабочего напряжения, времени обработки) изменяется в сторону уменьшения от 77 МПа до 25 МПа, относительно начального уровня 85 МПа. Общий характер распределения остаточных напряжений задается на стадии механической обработки и не изменяется после ЭПП (см. рис. 5: образец до ЭПП и образец, обработанный ЭПП при  $n=0,2$  моль/л,  $U=380$  В,  $\tau=3$  мин).

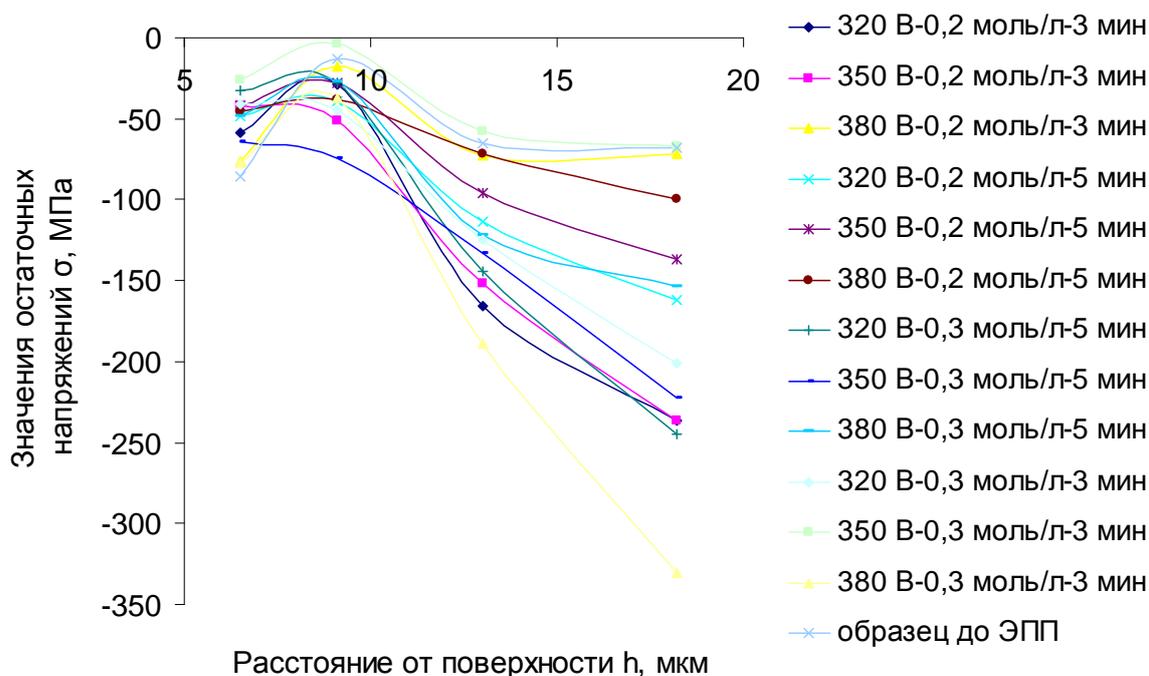


Рис. 5. Распределение значения остаточных напряжений в образцах из стали 30ХГСА после ЭПП в растворе хлористого аммония при  $n=0,2-0,3$  моль/л,  $U=320-380$  В,  $\tau=3-5$  мин

Металлографическим методом был исследован структурный состав поверхностных слоев обработанного материала, а также его микротвердость. Выявленные структуры поверхностных слоев и исходных материалов изображены на рис 6 соответственно (для рационального режима обработки - концентрация  $n$  электролита 0,2 моль/л, рабочее  $U$  напряжение 300 В, время  $\tau$  обработки 5 мин) и для предельных условий существования процесса ЭПП по одному из параметров (в данном случае величине рабочего напряжения, как наиболее влияющему на шероховатость обработанной поверхности). Как видно из представленных снимков структуры поверхности до и после обработки являются идентичными. Приповерхностная зона после ЭПП и исходная структуры низколегированной стали 30ХГСА представляют собой мелкозернистую бейнитную структуру (смеси частиц пересыщенного углеродом феррита и карбида цементитного типа), структурой высоколегированной стали 12Х18Н10Т является аустенит с присутствием карбидов внутри аустенитного зерна и небольшим наличием карбонитридов.

Исследование изменения микротвердости стали 30ХГСА после ЭПП показало, что значение величины микротвердости изменяется в пределах 10% по сравнению с исходным, регистрируемое изменение связано с температурным воздействием разрядов в процессе обработки, которое аналогично проведению такого вида термообработки металла как отпуск.

Суммируя полученные данные, можно констатировать, что после ЭПП свойства поверхностного слоя существенно не зависят от параметров технологического режима обработки, в частности от концентрации, времени обработки и величины рабочего напряжения, поскольку в ходе исследований

не выявлено изменений микроструктуры (что согласуется с представленной в главе 3 моделью распределения теплового поля в обработанной поверхности). Микротвердость поверхностного слоя и уровень остаточных напряжений изменяются в пределах 10%, что не оказывает существенного влияния на эксплуатационные характеристики обработанной поверхности.

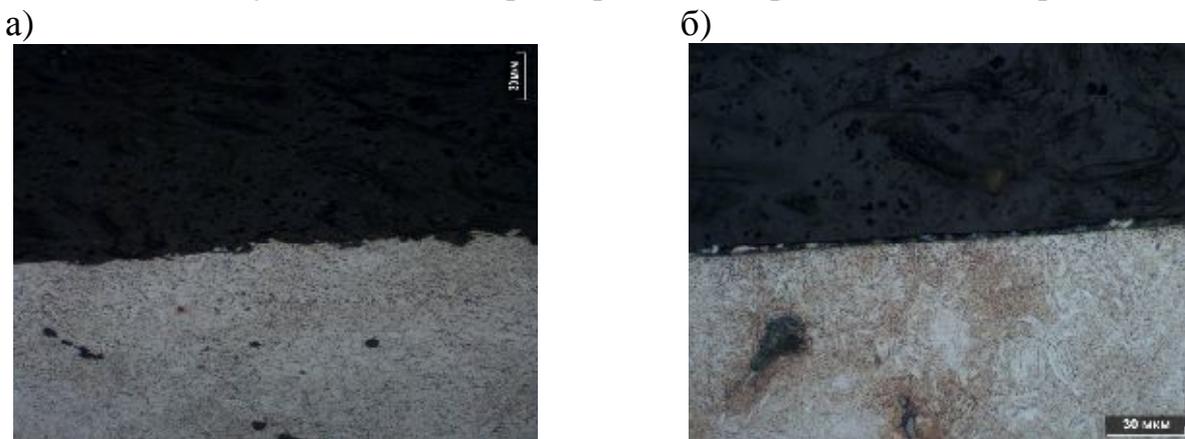


Рис. 6. Структура стали 30ХГСА

а) исходная (x300)

б) после ЭПП при  $U=300$  В,  $\tau=9$  мин,  $n=0,2$  моль/л (x500)

Сравнительное исследование методов ЭХП и ЭПП показало, что при времени обработки до 10 мин процесс ЭПП является производительнее, поскольку за одинаковое время обработки (9 мин и при  $Ra_{нач}=1,5-1,3$  мкм) достигается уровень шероховатости  $Ra=0,2$  мкм (при ЭХП – 0,8 мкм). Величина съема ( $m$ ) металла по массе (оценка производилась по наименьшей величине) больше при ЭПП ( $m_{эпп}=0,03$  г/мин) в 2 раза по сравнению с ЭХП ( $m_{эхп}=0,014$  г/мин).

**В пятой главе** рассмотрена оптимизационная модель процесса ЭПП и приведены результаты промышленных испытаний данного метода.

В модели представлено прогнозирование величины параметра  $Ra$  в зависимости от параметров процесса ЭПП при соответствующих уровнях производительности и себестоимости. В качестве целевой функции при ЭПП принимается наименьшая технологическая себестоимость ( $C$ ) или производительность ( $\Pi$ ) обработки при заданной величине среднеквадратичного отклонения профиля шероховатости поверхности. Процесс ЭПП рассматривался в виде технологической модели, представленной на рис. 7

По данным эмпирической модели произведен расчет целевой функции, результаты, которого сведены в соответствующие графики (см. рис 8 а-е) и по результатам математической обработки данных многофакторного эксперимента (см. глава 4) получен полином зависимости производительности обработки от параметров процесса ЭПП:

$$\Pi(U, n, \tau) = 2,21 - 5,45 \cdot n + 2,087 \cdot \tau - 5 \cdot n \cdot \tau + 0,0167 \cdot U \cdot n \cdot \tau + 8,3 \cdot 10^{-3} \cdot U \cdot n - 5 \cdot 10^{-3} \cdot U \cdot \tau - 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot U$$



Зависимость величины производительности от данных параметров является линейной, то есть увеличение любого из них приведет и к увеличению производительности полирования, причем степень влияния каждого из данных параметров соразмерна степени влияния другого.

Результат построения оптимизационной модели реализован в программе, написанной на языке программирования Visual Basic и позволяющей проводить расчет, исходя как из минимальной себестоимости, так и максимальной производительности.

При ЭПП сложнопрофильных поверхностей при кривизне поверхности 30-50 мм на длине ~ 100 мм наблюдается разброс значений неравномерности шероховатости по параметру Ra: для выпуклой поверхности – 0,01-0,02 мкм; для вогнутой – 0,02-0,03 мкм; для плоской – 0,01-0,02 мкм (рис. 9). Таким образом, неравномерность при полировании плоских и выпуклых поверхностей не отличаются, а при полировании вогнутых значение неравномерности больше, что происходит из-за большей неравномерности толщины газовой анодной оболочки со стороны вогнутой поверхности, тогда как вдоль плоской и выпуклой поверхностей парогазовый слой более равномерен.

Рассмотрены ЭПП плоских и сложнопрофильных поверхностей и особенности существования ГАО при полировании неплоских поверхностей.

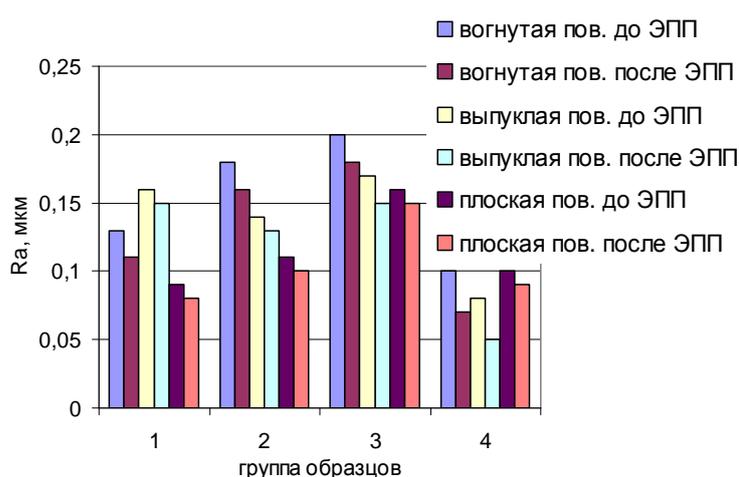


Рис. 9. Изменение неравномерности шероховатости различных поверхностей

Выявлено, что в случае обработки наружных неплоских поверхностей или поверхностей, являющихся односвязными, тепло отводится в находящийся вокруг детали электролит, что позволяет стабильно существовать ГАО, и далее переходит в окружающую среду и расходуется на испарение электролита. При ЭПП внутренних неплоских поверхностей диаметром менее 50 мм, выделяемое

ГАО тепловая энергия преобразует поверхностное кипение в пузырьковое на внутренней обрабатываемой поверхности, что препятствует стабильному существованию ГАО и отводу тепла при подобных условиях. Таким образом, обработку внутренних неплоских поверхностей рекомендуется проводить при соотношении диаметра внутренней поверхности к её длине не более 1:1.

Проведены соответствующие производственные испытания метода ЭПП на образцах из легированных сталей 20X13 и 15X11МФ с начальным уровнем параметра Ra = 2,5-0,4 мкм в водном растворе сернокислого натрия концентрацией 0,3 моль/л, температурой 95°C, рабочее напряжение

составляло 320 В, время обработки – 5 мин; достигнутое после ЭПП значение  $R_a = 1,1-0,1$  мкм соответственно. В результате испытаний установлено, что применение метода электролитно-плазменного полирования изделий из легированных сталей существенно снижает долю ручного труда и увеличивает производительность обработки до 3 раз по сравнению с механическим полированием.

### **Основные результаты и выводы по работе.**

Указанная выше цель работы была достигнута, при этом получены новые научные и практические результаты:

1. Определен состав газовой анодной оболочки, образующейся при ЭПП высоколегированной стали 12Х18Н10Т и состоящей из смеси ионов водорода, кислорода и катионов, применяемой в качестве электролита, соли, что подтверждает теорию о преобладании разрядного механизма съема материала в физической модели ЭПП, поскольку присутствие других атомов и молекул, необходимых для электрохимических реакций не выявлено.

2. Разработанная на основании калориметрирования тепловых потоков при ЭПП математическая конечно-элементная модель распределения теплового поля в обработанной поверхности выявила три температурные зоны: с температурой выше  $2800^{\circ}\text{C}$  – зона испарения, с температурой от  $1400^{\circ}\text{C}$  до  $2800^{\circ}\text{C}$  – зона плавления и зона твердого тела с температурой ниже  $1400^{\circ}\text{C}$ . Модель теплового поля позволяет оценить величину снимаемого материала (0,3-0,5 мкм) и время, необходимое для достижения требуемого уровня шероховатости полируемой поверхности, а также зону температурного влияния ( $\sim 1,4$  мкм), соответствующей отпущенному материалу, что подтверждается исследованием топографии обработанной ЭПП поверхности, выявившим наличие лунок диаметром порядка 0,6-0,8 мкм.

3. Установлен комплекс факторов и степень их влияния на изменение уровня шероховатости обработанной поверхности после ЭПП низколегированной стали 30ХГСА. Определено, что в диапазоне изменений величины рабочего напряжения 240-360 В, концентрации электролита 0,1-0,5 моль/л, параметр  $R_a$  достигает своего минимального значения  $R_a=0,17$  мкм при  $\sim 300$  В и  $\sim 0,3$  моль/л соответственно. Неравномерность уровня шероховатости, наблюдаемая при полировании выпуклых поверхностей, меньше на 0,02 мкм, чем при полировании вогнутых, что происходит из-за большей неравномерности толщины газового слоя.

4. Определено влияние ЭПП на такие параметры качества поверхностного слоя как структура, микротвердость и напряженно-деформированное состояние поверхностных слоёв. Выявлено, что структура обработанной поверхности не изменяется в процессе ЭПП, микротвердость и уровень остаточных напряжений изменяются в пределах 10%, что не

оказывает существенного влияния на эксплуатационные характеристики обработанной поверхности.

5. Построена оптимизационная модель управляющих параметров процесса ЭПП ( $U$  – рабочее напряжение,  $V$ ,  $n$  – концентрация электролита, моль/л,  $\tau$  – время обработки, мин), определяющих получение параметров шероховатости ( $Ra$  до 0,1 мкм) в заданных пределах при минимуме или максимуме целевой функции (технологической себестоимости или производительности процесса ЭПП соответственно). Выявлена область рациональных режимов применительно к ряду легированных сталей ( $Ra_{нач}=1$  мкм), обеспечивающих максимальную производительность ( $P=2,6 \cdot 10^{-3}$  мм/мин) и наименьшую себестоимость ( $C=147$  руб/дм<sup>2</sup>) при заданных параметрах качества обрабатываемой поверхности ( $Ra_{кон}=0,4$  мкм).

6. В случае обработки наружных неплоских поверхностей или поверхностей, являющихся односвязными, тепло отводится в находящийся вокруг детали электролит, что позволяет стабильно существовать ГАО, и далее переходит в окружающую среду и расходуется на испарение электролита. При ЭПП внутренних неплоских поверхностей диаметром менее 50 мм, выделяемое ГАО тепловая энергия преобразует поверхностное кипение в пузырьковое на внутренней обрабатываемой поверхности, что препятствует стабильному существованию ГАО и отводу тепла при подобных условиях. Таким образом, обработку внутренних неплоских поверхностей рекомендуется проводить при соотношении диаметра внутренней поверхности к её длине не более 1:1.

7. Сравнительное исследование методов ЭХП и ЭПП показало, что при времени обработки до 10 мин процесс ЭПП производительнее в 2 раза. Полученное повышение производительности достигнуто за счет взаимосвязей параметров процесса ЭПП (величины рабочего напряжения, концентрации электролита, времени обработки). В результате производственных испытаний на ОАО «Завод турбинных лопаток» установлено, что применение метода электролитно-плазменного полирования сталей 20X13 и 15X11МФ существенно снижает долю ручного труда и увеличивает производительность обработки до 3 раз по сравнению с механическим полированием.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

Публикации в центральных изданиях, включенных в перечень периодических изданий ВАК РФ:

1. Л.А. Ушомирская, В.И. Новиков. Полирование легированных сталей в нетоксичных электролитах при высоком напряжении // Металлообработка: научно-производственный журнал. – 2008. – № 1 (43). – С. 22-24.

2. Л.А. Ушомирская, А.И. Фоломкин, В.И. Новиков. Особенности чистовой обработки турбинных лопаток. // *Металлообработка: научно-производственный журнал*. – 2008. – № 4 (46). – С. 19-21.

3. Д.Е. Локтев, Л.А. Ушомирская, В.И. Новиков. Исследование параметров электролитно-плазменного полирования низколегированной стали методом планирования полного факторного эксперимента. // *Металлообработка: научно-производственный журнал*. – 2009. – № 5 (53). – С. 15-18.

4. Н.Б. Кириллов, С.Д. Васильков, В.И. Новиков. Исследование влияния электролитно-плазменного полирования на качество поверхностного слоя изделий из легированных сталей. // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. – 2010. – № 2-2 (100). – С. 130-135.

Публикации в других изданиях:

5. В.И. Новиков, Л.А. Ушомирская. Обработка фасонных поверхностей методом электролитно-плазменного полирования. // XXXIII Неделя науки СПбГПУ. Материалы межвузовской научно-технической конференции. – 2005. – Ч.III. – С. 95.

6. В.И. Новиков, В.С. Медко. Особенности методики исследования электролитно-плазменного полирования фасонных поверхностей. // XXXV Неделя Науки СПбГПУ: Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов. – 2006. – Ч.III. – С. 79-80.

7. В.И. Новиков, В.Д. Самойленко, Л.А. Ушомирская. Особенности установки электролитно-плазменного полирования деталей типа «Лопатка». // XXXVI Неделя Науки СПбГПУ: Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов. – 2007. – Ч.III. – С. 79-80.

8. В.И. Новиков, Л.А. Ушомирская. Исследование шероховатости поверхности сталей от параметров электролитно-плазменного полирования. // XXXVII Неделя Науки СПбГПУ: Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов. – 2008. – Ч.IV. – С. 106-107.

9. В.И. Новиков, Н.В. Виноградова. Исследование структуры и микротвердости поверхностного слоя сталей после ЭПП. // XXXVII Неделя Науки СПбГПУ: Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов. – 2008. – Ч.IV. – С. 107-108.

10. Д.Е. Локтев, В.И. Новиков, В.Д. Самойленко. Определение оптимальных технологических режимов электролитно-плазменного полирования сталей и сплавов. // XXXVIII международная научно-практическая конференция «Неделя науки СПбГПУ». Материалы докладов. – 2009. – С. 40-42.