

*На правах рукописи*

ЗВЕРЕВ ЕГОР АЛЕКСАНДРОВИЧ

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА  
ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ПОРОШКОВОГО  
МАТЕРИАЛА МАРКИ ПГ-С27

Специальность: 05.02.07 – технология и оборудование механической и  
физико-технической обработки

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск – 2011

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Новосибирский государственный технический университет"

**Научный руководитель:** кандидат технических наук, доцент  
Чёсов Юрий Степанович

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор  
Марков Андрей Михайлович

кандидат технических наук  
Рахимьянов Константин Харисович

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВПО "Сибирский государственный университет путей сообщения", г. Новосибирск

Защита диссертации состоится "21" декабря 2011 г. в 14<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета Д 212.173.07 при ФГБОУ ВПО "Новосибирский государственный технический университет" по адресу: 630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета.

Автореферат разослан "18" ноября 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент

Никитин Ю.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Детали машин современного технологического оборудования работают при тяжелых режимах нагружения и часто выходят из строя по причине износа рабочих поверхностей. Поэтому возникает потребность в повышении физико-механических свойств поверхностных слоев деталей. На практике это достигается различными методами поверхностного упрочнения, в том числе путем нанесения износостойких покрытий. Сочетание покрытия, обладающего высоким уровнем физико-механических и эксплуатационных свойств, с пластичной, вязкой и трещиностойкой основой (что присуще недорогим маркам сталей) дает наибольший экономический эффект. Кроме того, часто возникает необходимость в восстановлении изношенных деталей.

В настоящее время в технологии машиностроения при нанесении износостойких покрытий широкое распространение получили такие методы, как наплавка и газотермическое напыление (электродуговая металлизация, детонационное, газоплазменное и плазменное), каждый из которых обладает своими достоинствами и недостатками. Среди достоинств метода плазменного напыления можно выделить высокую производительность, хорошую управляемость, а также возможность обработки деталей различной конфигурации и габаритов. В настоящее время существует большое многообразие марок порошков для изготовления износостойких покрытий. Одним из известных и распространенных материалов является высокохромистый чугун марки ПГ-С27. Покрытия из данного порошка нашли широкое применение при упрочнении рабочих органов самого разнообразного по назначению технологического оборудования: почвообрабатывающих машин, экструдеров, строительной, дорожной, буровой, металлообрабатывающей и другой техники. В связи с этим вопрос обеспечения качества данных покрытий имеет существенное значение.

В целом качество покрытий является сложной комплексной характеристикой, зависящей от множества факторов технологического процесса, и формируется последовательно на этапах предварительной обработки поверхности, нанесения покрытия и финишной обработки поверхности покрытия. В значительной степени качество деталей определяется стадией финишной обработки

Самым распространенным способом финишной обработки износостойких покрытий является шлифование, которое обеспечивает возможность высококачественной обработки покрытий с высоким уровнем твердости. Однако в ряде случаев возможности управления процессом шлифования не позволяют избежать дефектов (трещин, сколов и отслоений), обусловленных уровнем остаточных напряжений и структурой покрытий, сформированных на этапах предварительной обработки и напыления. Поэтому комплексное решение по обеспечению качества покрытий, рассматривающее этапы формирования покрытий, как единый процесс с позиции теории технологической наследственности, позволяет расширить возможности обеспечения качества покрытий на этапе финишной обработки шлифованием, представляется актуальным.

Исследования, представленные в диссертационной работе, выполнены в рамках федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009 – 2013 годы", а так же в рамках аналити-

ческой ведомственной целевой программы "Развитие научного потенциала высшей школы на 2009 – 2011 годы".

**Цель работы:** повышение качества плазменных покрытий из порошкового материала марки ПГ-С27 на основе разработки методики назначения режимов обработки на каждом этапе технологического процесса.

Для достижения поставленной цели необходимо последовательно решить следующие **задачи:**

1. Выявить основные значимые факторы на каждой стадии технологического процесса.

2. Получить связь показателей качества поверхности основы перед напылением с режимами струйно-абразивной обработки и установить диапазон варьирования.

3. Установить зависимости между наиболее значимыми показателями качества покрытий и технологическими режимами плазменного напыления.

4. Определить зависимость параметров поверхности покрытий от режимов финишного шлифования и установить рациональную область режимов обработки.

5. Разработать технологические рекомендации для повышения износостойкости быстроизнашиваемых деталей.

6. Апробировать результаты исследований.

#### **Научная новизна.**

1. Разработана методика назначения режимов обработки на стадиях предварительной струйно-абразивной очистки, плазменного напыления и финишного шлифования, основанная на учете технологической наследственности на каждом этапе обработки и обеспечивающая повышение качества плазменных покрытий из порошкового материала марки ПГ-С27.

2. Установлены взаимосвязи параметров качества покрытий: адгезионной прочности, пористости, остаточных напряжений от технологических режимов плазменного напыления в виде системы регрессионных уравнений, позволяющие обеспечить качество на этапе финишного шлифования.

#### **Практическая значимость работы:**

1. Результаты исследований позволяют обеспечить качество покрытий за счет рациональных режимов обработки на каждой стадии технологического процесса, включая предварительную струйно-абразивную обработку, плазменное напыление и финишное шлифование.

2. Разработаны рекомендации по промышленному использованию результатов исследований при повышении износостойкости элементов технологической оснастки штампов для производства подкладок к стрелочным переводам.

3. Результаты исследований использованы в учебном процессе НГТУ при подготовке студентов по специальностям 151002—"Металлообрабатывающие станки и комплексы" и 260601—"Машины и аппараты пищевых производств".

#### **На защиту выносятся следующие положения:**

1. Методика комплексного назначения режимов обработки на стадиях предварительной струйно-абразивной очистки, плазменного напыления и фи-

нишного шлифования с учетом технологической наследственности на каждом этапе обработки.

2. Результаты экспериментальных исследований струйно-абразивной обработки поверхности деталей под нанесение покрытий.

3. Технологические режимы плазменного напыления износостойких покрытий.

4. Результаты металлографических исследований структуры покрытий.

5. Результаты испытаний эксплуатационных свойств покрытий.

6. Результаты экспериментальных исследований финишной обработки покрытий шлифованием.

**Реализация работы.** Внедрение результатов работы осуществлено на ОАО "Новосибирский стрелочный завод" (г. Новосибирск) и в учебном процессе НГТУ.

**Личный вклад автора** заключается в постановке и решении задач экспериментальных исследований, в обработке и анализе полученных результатов, формулировке выводов.

**Апробация работы.** Основные результаты, представленные в диссертационной работе, докладывались на Всероссийских научно-технических конференциях: "Наука. Технологии. Инновации", г. Новосибирск, 2006 г.; "Наука. Промышленность. Оборона", г. Новосибирск, 2008 г.; "Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе", Новосибирск, 2008, 2009, 2010, 2011 гг.; Всероссийской научной конференции с международным участием "Научное творчество XXI века", Красноярск, 2010г. Международных научно-практических конференциях: "Ресурсосберегающие технологии ремонта, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня", Санкт-Петербург, 2009, 2010, 2011 гг.; "Современная металлургия начала нового тысячелетия", Липецк, 2009 г.; "Обогащение минерального сырья. Процессы и оборудование", Новосибирск, 2007 г.; "Прогрессивные технологии и оборудование для обогащения рудных и нерудных материалов", Новосибирск, 2010 г.; "Прогрессивные технологии в современном машиностроении", Пенза, 2010 г.; "Инновации в машиностроении", Бийск, 2010 г., Кемерово 2011 г.

**Методы исследований.** Работа выполнена на базе основных положений теории плазменного напыления, технологии машиностроения, теории математического планирования эксперимента. Представленные в работе результаты получены на основе экспериментальных исследований с использованием апробированных методик, современных измерительных приборов и оборудования.

**Публикации.** Основное содержание диссертации отражено в 23 печатных работах, из которых: 5 статей опубликованы в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ, 1 – статья в рецензируемом журнале, 4 – в сборниках научных трудов, 13 – в сборниках трудов международных и Всероссийских научно-технических конференций.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка использованных источников из 128

наименований и приложений. Работа содержит 142 страницы основного текста, в том числе 8 таблиц и 62 рисунка.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** кратко рассмотрена область применения износостойких покрытий, используемых для повышения эксплуатационных свойств рабочих поверхностей деталей. Перечислены основные группы методов нанесения покрытий, включая метод плазменного напыления. Рассмотрены основные научные проблемы, связанные с нанесением покрытий.

**В первом разделе** диссертации проведен обобщенный анализ влияния технологических факторов на качество плазменных покрытий на каждом этапе обработки.

Качество покрытий в значительной степени определяется финишной стадией механической обработки покрытий шлифованием. Особенности формообразования при шлифовании плазменных покрытий раскрыты в работах Ситникова А.А., Харламова Ю.А. и других.

Процесс шлифования характеризуется нестабильностью параметров качества обработанной поверхности. В ряде случаев возможности управления процессом шлифования ограничены и не позволяют избежать появления дефектов, сформированных на этапах предварительной обработки и плазменного напыления.

В большинстве случаев в качестве предварительной обработки поверхности перед напылением используется процесс струйно-абразивной очистки (САО).

Основной задачей предварительной обработки является обеспечение требуемой адгезионной прочности. В работах Верстака А.А., Куприянова И.Л., Ильющенко А.Ф. установлено значительное влияние шероховатости поверхности основы на адгезионную прочность: она должна быть сопоставима с фракционным размером напыляемых частиц, что гарантирует лучшее сцепление.

Теоретические основы плазменного напыления достаточно глубоко изучены в работах Кудинова В.В., Пузрякова А.Ф., Борисова Ю.С., Барвинка В.А., Витязь П.А., Хасуя А. и других авторов. Одной из сложных задач является управление качеством покрытий за счёт изменения энергетических режимов напыления. Для решения данной проблемы предпринимались попытки получения как теоретических, так и эмпирических зависимостей, устанавливающих связь режимов напыления со свойствами покрытий.

При выборе режимов плазменного напыления, которые определяют энергетическое состояние напыляемых частиц (температура и скорость), приходится решать противоречивую задачу. Для формирования наиболее благоприятного варианта структуры требуется увеличение температуры частиц в плазменной струе для повышения степени расплавленности. Однако при этом в структуре покрытия повышается уровень остаточных напряжений, что негативно отражается на их прочности. К тому же увеличение энергии плазмы способствует выгоранию легирующих элементов или сгоранию отдельных порошковых частиц.

Таким образом, при реализации процесса плазменного напыления возникает необходимость в определении рациональной области режимов.

На стадии финишного шлифования выбранные режимы резания должны обеспечивать размерную точность и качество поверхности. Необходимо исключить появление дефектов, вызванных чрезмерным перегревом в зоне обработки и ростом остаточных напряжений. Поэтому требуется постановка экспериментов по разработке алгоритма управления процессом.

В результате проведенного обобщенного анализа сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

**Во втором разделе** обоснован выбор методов исследования структуры и свойств покрытий, установок, необходимых при проведении экспериментов а также приведено обоснование выбора материала износостойкого покрытия.

В качестве основного материала для изготовления лабораторных образцов использовалась сталь 20.

Для практического изучения влияния режимов САО на шероховатость поверхности была использована струйно-абразивная камера типа КСО-110-ИФВ-РМ. В качестве абразивного материала принят электрокорунд марки 13А с зернистостью 120 (ГОСТ 28818).

Для проведения основных исследований в области нанесения покрытий использовалась плазменная установка "Киев-7". Напыление осуществлялось электродуговым плазмотроном ПУН-8 (ТУ 26-05-61-86) мощностью 40 кВт. Для замера температуры нагрева образцов использовался бесконтактный инфракрасный пирометр *Optris MiniSight*.

Финишная механическая обработка покрытий производилась на круглошлифовальном станке модели 3Б12. Инструмент – абразивный круг из карбида кремния зеленого марки 64С80ПСМ28Б1.

Металлографические исследования образцов с покрытиями проводили на оптических микроскопах *NIKON Eclipse MA100* и *Carl Zeiss AxioObserver A1m*. Твердость напыленных покрытий и характер её распределения по глубине определяли измерением микротвердости на приборе ПМТ-3 в соответствии с ГОСТ 9450-76.

Химический состав напыляемого порошка и покрытия анализировали с помощью рентгенофлуоресцентного спектрометра *ARL Optim'X* и растрового электронного микроскопа *Carl Zeiss EVO50 XVP*, оснащенного микроанализатором химических элементов *EDS X-Act (Oxford Instruments)*. Оценка фазового состава покрытия производилась путем расшифровки дифракционных картин, снятых с поверхности покрытия. Дифракционные картины были зарегистрированы на  $\Theta$ - $\Theta$  дифрактометре с использованием медной трубки в качестве источника рентгеновского излучения.

Для оценки адгезионной прочности покрытий применялся метод "сдвига", для чего была создана специальная установка.

При определении уровня остаточных напряжений первого рода в покрытиях использовался неразрушающий экспериментально-расчетный метод "наращивания", заключающийся в деформации пластины в момент напыления на неё слоя покрытия.

Определение толщины напыленного слоя производилось с помощью цифрового контактного толщиномера индукционного типа модели Константа МКЗ. Измерение шероховатости производили на базе комплекса изучения топографии модели *Zygo New View 7300*, а также при помощи профилометра *Elcometer 223*.

Испытание образцов на изнашивание в условиях трения скольжения проводили на установке, позволяющей реализовать схему "врезающийся индентор", а на контактно-усталостную выносливость покрытий – на установке, работающей по схеме "пульсирующий контакт".

Очевидно, что качество слоя и износостойкость покрытий во многом зависят от химического состава порошкового материала. На начальном этапе экспериментальных исследований были произведены сравнительные испытания по критериям адгезионной прочности и износостойкости покрытия из четырех марок порошков: ПГ-С27, ПГ-10Н-01, ПС-12НВК-01, и ПР-ШХ15Д. По результатам экспериментов в качестве объекта для дальнейших исследований и был принят высокохромистый чугун марки ПГ-С27.

**Третий раздел** посвящен проведению экспериментальных исследований с целью установления влияния параметров технологического процесса на показатели качества покрытий.

Как показал обобщенный анализ, выполненный в первом разделе, наиболее значимым фактором, влияющим на адгезионную прочность является шероховатость поверхности основы. На стадии предварительной обработки поверхности для определения влияния режимных условий процесса САО на шероховатость поверхности перед напылением был проведен ряд экспериментов. Управляемыми параметрами были выбраны расстояние от сопла пистолета до поверхности (дистанция)  $l$  (60...150 мм) и длительность обработки  $\tau$  (30...120 с). Для используемой пневмоструйной установки величина давления сжатого воздуха составляла  $P_B = 0,5$  МПа, расход воздуха  $G_B = 2,1$  м<sup>3</sup>/мин при диаметре сопла пистолета  $d_C = 12$  мм. При этом обеспечивался расход абразива  $G_{АБР} = 95$  кг/час.

Опытные данные обрабатывались с использованием программного продукта *Table Curve 3D v 4.0*. В результате была получена зависимость (1) с коэффициентом корреляции, равным 0,97.

$$R_z(l, \tau) = 131,6 - \frac{2351,2}{l} - 3,72\tau + 0,07\tau^2 - 3,44 \cdot 10^{-4} \tau^3. \quad (1)$$

Анализ этой функции показывает, что с увеличением дистанции наблюдается рост величины  $R_z$ . Это связано с тем, что до определенного момента увеличивается интенсивность обработки вследствие увеличения площади контакта и возможности разгона частиц до большего значения. При увеличении времени воздействия значение  $R_z$  сначала возрастает, однако затем снижается. Это обусловлено тем, что в процессе обработки происходит откалывание микровыступов и образуется новая поверхность с меньшей шероховатостью и пластически деформированным слоем.

Совместный учет факторов позволяет получить шероховатость поверхности в пределах  $R_z = 30...100$  мкм.



Для разработки системы регрессионных уравнений плазменного напыления при прочих равных условиях в качестве управляемых режимных параметров были приняты сила тока дуги плазмотрона  $I$  (диапазон варьирования значений – 116...160 А), при напряжении  $U = 140$  В, расход плазмообразующего газа (воздуха)  $G$  (13...27 л/мин), при давлении  $P = 0,4$  МПа, и дистанция напыления  $L$  (80...160 мм). Массовый расход порошка составлял  $G_{\text{ПОР}} = 1,5$  кг/ч. Напыление осуществлялось при вращении образцов с линейной скоростью  $V_{\text{д}} = 12$  м/мин и скоростью перемещения (подачей) плазмотрона  $S = 300$  мм/мин.

За основу проведения исследований принят ортогональный центрально-композиционный план второго порядка. В результате была получена система регрессионных уравнений процесса плазменного напыления

$$\sigma_{\text{ад}} = 130,62 - 2,316I + 3,878G - 0,086L + 0,009I^2 - 0,124G^2 + 0,007IG. \quad (2)$$

$$\Pi = -159,45 + 4,48I - 7,308G - 0,714L - 0,018I^2 + 0,159G^2 + 0,003L^2 + 0,008IG. \quad (3)$$

$$\sigma_{\text{ОН}} = 161,22 - 3,713I + 0,018I^2 + 3G - 0,099G^2 + 1,06L - 0,003L^2 - 0,004IL. \quad (4)$$

Данная модель позволила оценить степень влияния каждого из факторов и выявить их количественную взаимосвязь. С увеличением силы тока возрастает адгезионная прочность и снижается пористость. Это объясняется повышением температуры струи, вследствие чего в ней уменьшается количество нерасплавленных частиц. При достижении же критического значения силы тока происходит перегрев и выгорание частиц в плазменной струе.

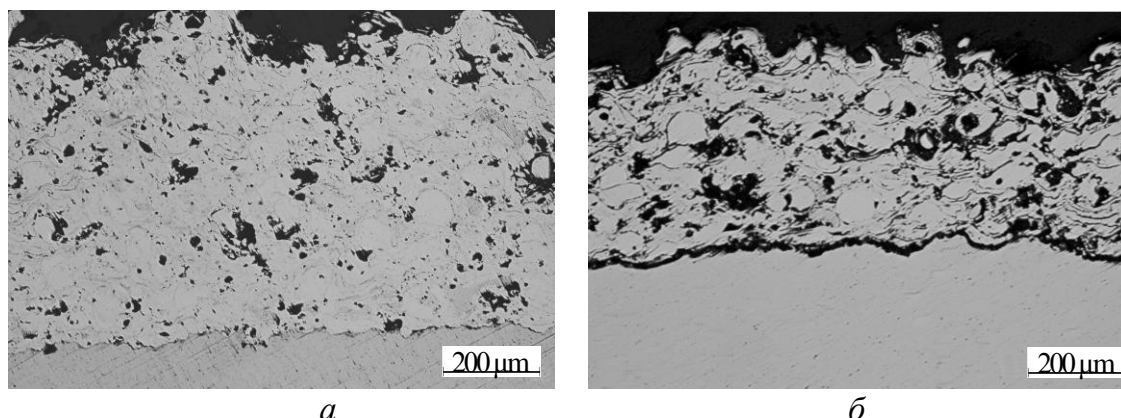
Увеличение расхода газа сказывается положительно лишь до определенного момента. Это обусловлено сложным влиянием величины расхода на состояние плазменной струи: с увеличением расхода газа растет скорость истечения плазмы (растет и кинетическая энергия частиц порошка), но при этом происходит снижение тепловой мощности струи, что отрицательно сказывается на температуре частиц. В исследуемом диапазоне режимов напыления адгезионная прочность покрытий и пористость изменяются в пределах 9,8...26,4 МПа и 4...26% соответственно.

В результате анализа экспериментальных данных было выявлено, что в процессе напыления знак напряжений не изменяется. Величина растягивающих напряжений главным образом зависит от температуры нагрева образцов, а наибольшее влияние на нее оказывает ток дуги плазмотрона. Увеличение силы тока дуги сопровождается ростом температуры основы. Это объясняется тем, что с увеличением силы тока растет и тепловая мощность плазменной струи.

В то же время с повышением расхода плазмообразующего газа наблюдается обратная картина: снижение температуры образцов, поскольку при этом уменьшается теплосодержание плазмы. Практически тоже воздействие оказывает и дистанция напыления: ее увеличение приводит к снижению температуры основы. В исследуемом диапазоне режимов плазменного напыления покрытий уровень остаточных напряжений находился в пределах 7...60 МПа.

Металлографический анализ показал, что в исследуемом диапазоне режимов напыления наблюдаются структура покрытия, характерные варианты которой условно были названы структурами типа А, Б (не показана) и В (рис. 1).

Идентификация производилась по таким структурным показателям, как пористость и размеры пор, количество нерасплавленных и степень деформации частиц, несплошность переходной границы (таблица).



*а* *б*  
 Рис. 1. Структуры покрытий (x100):  
 а) структура типа А; б) структура типа В

Таблица

Структурные показатели покрытий

Тип структуры	Пористость средняя П, %	Средний диаметр пор $D_{\text{СР}}$ , мкм	Несплошность границы НС, %	Доля нерасплавленных частиц НР, %	Степень деформации ФФ
А	4...13	5...9	7...12	2...8	0,15...0,22
Б	13...20	9...16	12...19	8...17	0,22...0,34
В	20...26	16...20	19...47	17...24	0,34...0,47

Очевидно, что с позиции показателей качества покрытий, наилучшими свойствами обладают образцы со структурой типа А. Наихудший вариант – структура типа В, а структура типа Б занимает промежуточное положение.

Совместный анализ вариантов структур и сочетаний условий обработки, при которых они были получены, позволил разбить весь исследуемый диапазон режимов напыления соответственно на три характерные области (поддиапазоны). Структура типа А стабильно формируется при  $I = 140...160$  А,  $G = 18...22$  л/мин и  $L = 110...125$  мм; структура типа Б – при  $I = 120...140$  А,  $G = 13...18$  л/мин и  $L = 80...110$  мм, а структура типа В –  $I = 116...120$  А,  $G = 22...27$  л/мин и  $L = 125...160$  мм.

В зависимости от режимов напыления частицы обладают различными значениями температуры, скорости и длительности нахождения в полете. Поэтому характер сформировавшейся структуры покрытия можно обосновать через такие обобщенные энергетические параметры плазменной струи, как температура и скорость (с учетом дистанции напыления).

Оценочные расчеты температуры струи на срезе сопла плазматрона и средней скорости струи позволили оценить влияние уровня энергетического воздействия плазменной струи на тип структуры.

Структура покрытий типа А формируется в диапазоне значений температур порядка 6000...7500 К и скорости струи порядка 630...750 м/с, структура типа Б – 6400...9300 К и 450...600 м/с, структура типа В – 3900...4800 К и 760...930 м/с.

Несмотря на то, что температура плазмы при образовании структуры типа А несколько ниже по сравнению со структурой типа Б, скорость истечения струи, а, следовательно, и кинетическая энергия частиц, выше. К тому же при ее получении дистанция напыления позволяет расплавленным частицам порошка разогнаться до максимальных значений. Структура типа В образуется при значительном расходе плазмообразующего газа, вследствие чего существенно снижается теплосодержание струи, поэтому частицы порошка не успевают полностью расплавиться.

Экспериментальные исследования показали, что структура покрытий типа А обладает и наибольшим уровнем эксплуатационных свойств. По сравнению со структурой типа В износостойкость данных покрытий выше в 2 раза, а контактная выносливость соответственно в 2,5 раза. Именно данный вариант структуры покрытий типа А и был выбран в качестве базового при выполнении дальнейших исследований.

В связи с тем, что при плазменном напылении порошковые частицы претерпевают значительные термические нагрузки, возникает необходимость в более глубоком изучении структуры на микроуровне. Исследования показали, что изменения химического и фазового состава после напыления незначительны, что свидетельствует об эффективности выбранных режимов.

Для проведения экспериментальных исследований по установлению влияния режимов круглого шлифования на шероховатость поверхности покрытий в качестве варьируемых режимных параметров приняты глубина резания  $t$  (0,05...0,15 мм) и линейная скорость детали  $V_d$  (13...27 м/мин) при толщине припуска в пределах 0,2...0,25 мм. При диаметре шлифовального круга, равном 300 мм, обеспечивалась рекомендуемая при шлифовании износостойких покрытий скорость резания  $V_p = 35$  м/с. Скорость продольного перемещения (подачи) стола составляла  $S_{пр} = 120$  мм/мин.

На рис. 2 приведен снимок типовой поверхности покрытия и соответствующая ему профилограмма после шлифования. Характерной особенностью покрытий является наличие открытой пористости. На профилограммах поверхности отчетливо видны "провалы", обусловленные пористостью. В целом обработанная поверхность покрытий имеет нерегулярный микрорельеф.

С целью установления влияния режимов абразивного шлифования на уровень шероховатости поверхности по критерию  $Ra$  был проведен двухфакторный эксперимент, позволивший получить эмпирическую зависимость следующего вида (коэффициент корреляции равен 0,95)

$$Ra = 1,44 - 0,187V_d + 8,91t + 0,004V_d^2 - 62,63 \cdot t^2 + 0,46V_d t, \quad (5)$$

где  $V_d$  – линейная скорость детали;  
 $t$  – глубина резания.

Исследования показали, что в принятом диапазоне режимов шлифования напыленных покрытий формируется микрорельеф поверхности с шероховатостью в пределах 0,15...1,50 мкм.

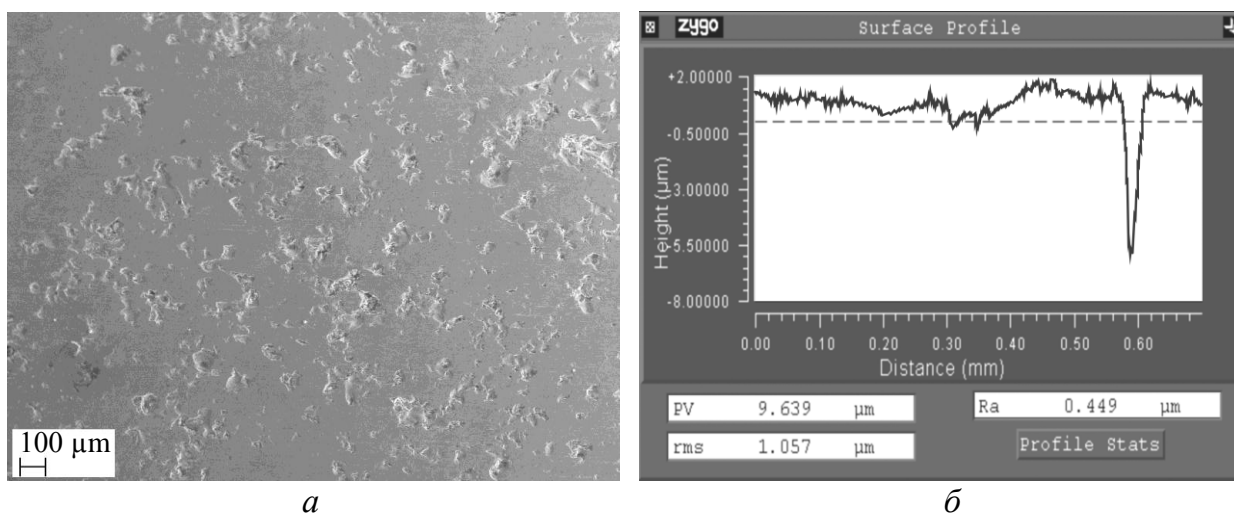


Рис. 2. Поверхность покрытия после шлифования:  
 а) топография поверхности; б) профилограмма поверхности

Зависимость отражает сложное и неоднозначное влияние глубины резания и круговой подачи на уровень шероховатости поверхности. В частности, увеличение глубины резания в диапазоне малых частот вращения образцов не сопровождается заметным ростом шероховатости. В то же время увеличение линейной скорости детали благоприятно сказывается лишь до определенного предела (порядка 20 м/мин), ее дальнейший рост приводит к отрицательному эффекту – увеличению высоты микронеровностей. Одновременное же повышение  $V_d$  и  $t$  вызывает резкий рост шероховатости. Это объясняется развитием поверхностных дефектов вследствие создания достаточно жестких режимных условий шлифования. Полученная зависимость позволяет на финишной стадии обработки на основе предъявляемых требований к шероховатости поверхностей деталей назначать соответствующие режимы абразивного шлифования износостойких покрытий.

Таким образом, проведенные исследования позволили разработать методику для комплексного обеспечения качества плазменных покрытий. Последовательность назначения технологических режимов на всех стадиях изображена в виде блок-схемы (рис. 3). Она наглядно отражает технологическую наследственность этапов.

Так на стадии предварительной обработки требуемый интервал времени воздействия САО можно определить по зависимости (рис. 4), построенной на основе функции (1). Рекомендуемый интервал времени, выделенный на кривой, обеспечивает уровень шероховатости поверхности в пределах 95...100 мкм (что сопоставимо с фракционным размером частиц напыляемого порошка), способствующий повышению адгезионной прочности.

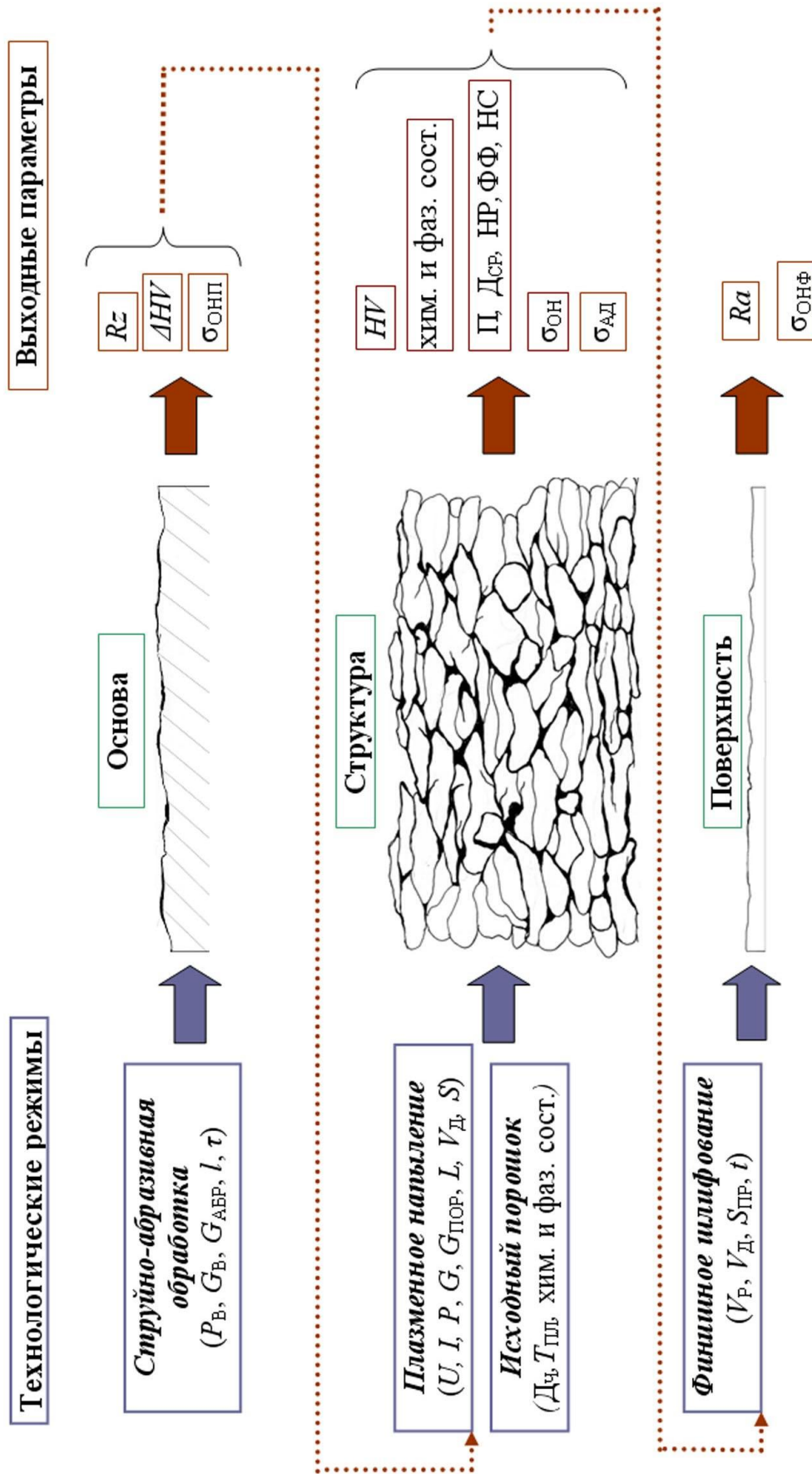


Рис. 3. Схема влияния параметров процесса на качество покрытий с учетом технологической наследственности

Продолжительность обработки больше рекомендуемой сопровождается уменьшением  $Rz$ , а также нежелательным ростом уровня остаточных напряжений  $\sigma_{ОНП}$  и степени наклепа  $\Delta HV$ , что приводит к снижению адгезионной прочности покрытий.

При назначении режимов плазменного напыления используется графическое изображение взаимосвязи показателей качества покрытий согласно полученным уравнениям (2)-(4). На рис. 5 показана область возможных сочетаний условий режимов плазменной обработки.

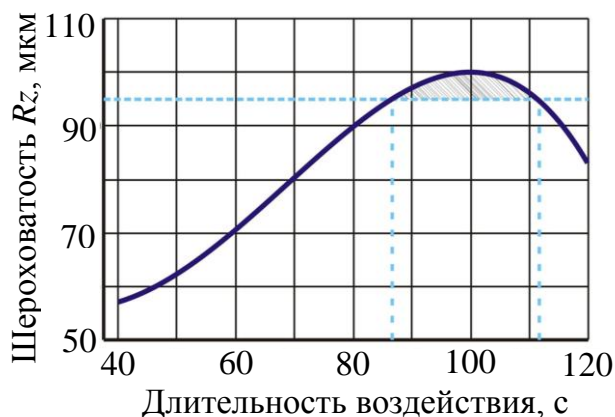


Рис. 4. Зависимость шероховатости поверхности от времени обработки САО (при  $l=150$  мм)

Совместное решение данной задачи с результатами металлографического анализа позволяет выделить подобласть формирования наиболее благоприятной модификации структуры типа А, которая способствует обеспечению минимальной шероховатости покрытий после шлифования. Режимы напыления назначаются с учетом возможной минимизации уровня остаточных напряжений.

Покрытие требуемой толщины наносится послойно. Толщина слоя, наносимого за один проход, настраивается с помощью изменения расхода порошка, для чего используются пробные образцы. Во избежание резкого роста остаточных напряжений толщина единичного слоя не должна превышать 0,2 мм.

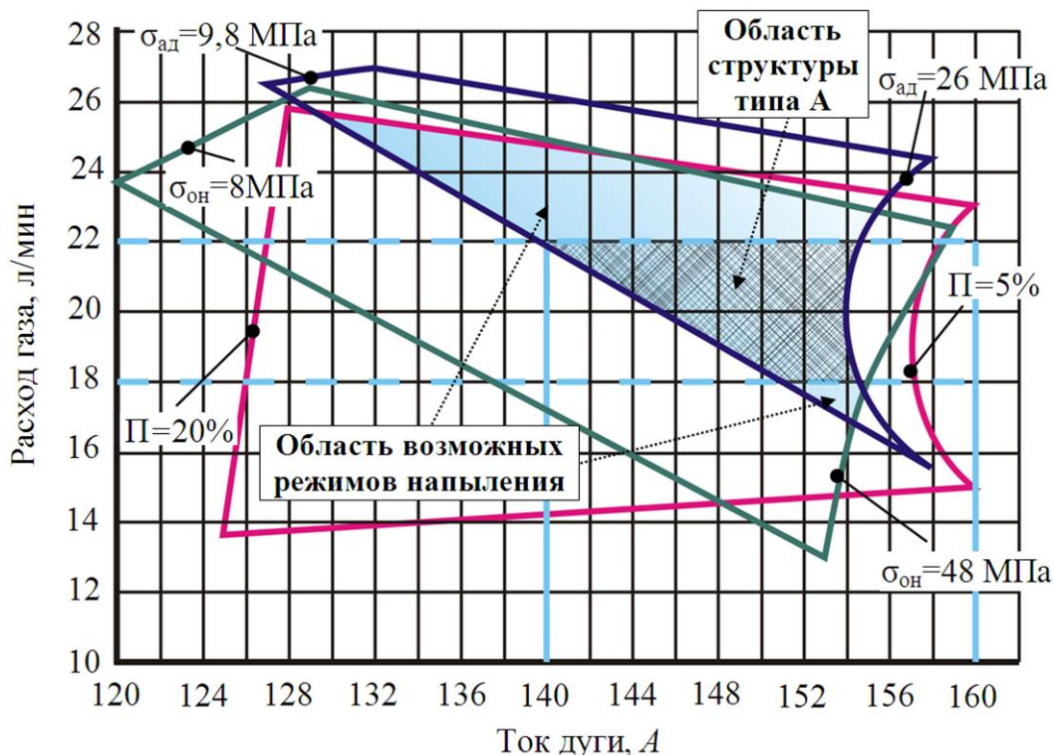


Рис. 5. Определение области режимов плазменного напыления при фиксированной дистанции ( $L=110$  мм)

Режимы шлифования определяются на основе зависимости (5). На рис. 6 показаны линии сочетаний условий обработки для получения требуемой шероховатости поверхности.

В зависимости от припуска на обработку, рассчитанного по известным методикам, выбирается глубина резания, обеспечивающая минимальное число проходов при шлифовании, чем достигается максимальная производительность обработки.

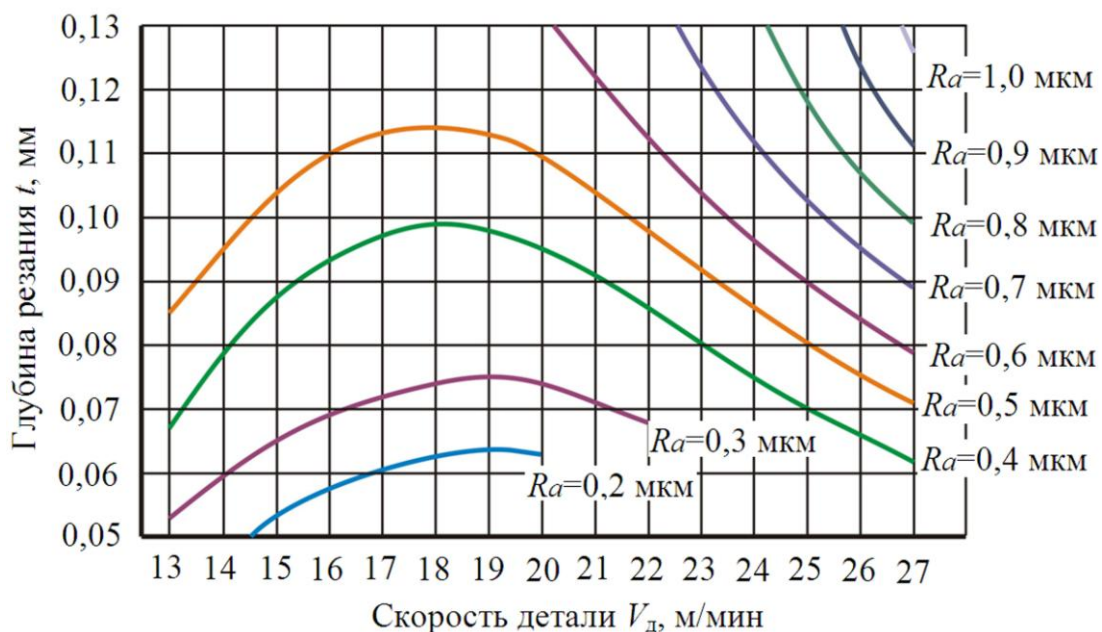


Рис. 6. Определение режимов обработки для финишного шлифования

Таким образом, в данном разделе на основе экспериментальных исследований была разработана обобщенная методика назначения технологических режимов обработки на этапе формирования плазменных покрытий из порошкового материала марки ПГ-С27.

**Четвертый раздел** посвящен промышленному использованию результатов диссертационных исследований.

Результаты диссертационной работы апробированы и внедрены на ОАО "Новосибирский стрелочный завод" при производстве специальных подкладок используемых в системе крепления рельсов на стрелочном переводе. Производство этих изделий осуществляется при помощи штампа, на котором одновременно совершаются операции пробивки отверстий и рубки стальной полосы. Одной из серьезных проблем является быстрое изнашивание поверхностей вкладышей при трении скольжения в момент перемещения стальной полосы. Поверхности вкладышей выполняют функцию базовых поверхностей, следовательно, их размерный износ влияет на геометрическую точность выпускаемых подкладок. При внедрении новой технологии в качестве основного материала деталей была использована сталь 20. Процесс изготовления вкладышей производился с учетом толщины рабочего слоя покрытия.

По сравнению с типовыми деталями, изготовленными из стали 45 и подвергнутыми объемной закалке, износостойкость деталей упрочненных плаз-

менным напылением выше на 15%. К тому же применение метода плазменного напыления позволило многократно восстанавливать изношенные детали, в результате чего был существенно сокращен выпуск новых деталей.

### **Основные результаты и выводы**

1. Установлено, что основными значимыми факторами, определяющими качество покрытий являются: на этапе струйно-абразивной обработки – шероховатость поверхности основы; на этапе плазменного напыления – адгезионная прочность, пористость и уровень остаточных напряжений; на этапе финишного шлифования – шероховатость обработанной поверхности.

2. Получена зависимость для струйно-абразивной обработки, позволяющая определять соотношения дистанции  $l$  и времени воздействия  $\tau$  при фиксированных значениях давления сжатого воздуха  $P_B = 0,5$  МПа, расхода воздуха  $G_B = 2,1$  м<sup>3</sup>/мин и расхода абразива  $G_{ABP} = 95$  кг/час, для обеспечения шероховатости поверхности основы перед напылением в пределах  $Rz = 30...100$  мкм. Определен интервал  $Rz = 95...100$  мкм, способствующий повышению адгезионной прочности.

3. Экспериментально установлено, что при изменении режимов напыления в диапазонах: силы тока дуги плазмотрона  $I = 116...160$  А; расхода плазмообразующего газа (воздуха)  $G = 13...27$  л/мин; дистанции напыления  $L = 80...160$  мм значения характеристик качества покрытий изменяются в следующих пределах: адгезионная прочность  $\sigma_{ад} = 9,8...26,4$  МПа; пористость  $\Pi = 4...26\%$ ; уровень остаточных напряжений  $\sigma_{ОН} = 7...60$  МПа.

4. Установлены сочетания режимов плазменного напыления, обеспечивающие формирование трёх модификаций структуры покрытий – тип А ( $I = 140...160$  А,  $G = 18...22$  л/мин и  $L = 110...125$  мм), тип Б ( $I = 120...140$  А,  $G = 13...18$  л/мин и  $L = 80...110$  мм) и тип В ( $I = 116...120$  А,  $G = 22...27$  л/мин и  $L = 125...160$  мм), различающихся пористостью, размерами пор, количеством нерасплавленных частиц, несплошностью переходной границы и степенью деформации частиц. Установлено, что структура типа А на этапе финишного шлифования обеспечивает наилучшее соотношение показателей качества.

5. Получена зависимость шероховатости поверхности покрытий от режимов финишного шлифования – глубины резания  $t$  и линейной скорости детали  $V_d$ , при значениях скорости круга  $V_p = 35$  м/с, и продольной подачи  $S_{пр} = 120$  мм/мин, позволяющая определять сочетания значений  $t$  и  $V_d$  для обеспечения шероховатости в пределах  $Ra = 0,15...1,50$  мкм.

6. На основе полученных функциональных зависимостей предложена методика назначения режимов обработки на всех стадиях технологического процесса, которая позволяет повысить качество плазменных покрытий из порошкового материала марки ПГ-С27 за счет согласования результирующих параметров предварительной обработки и напыления с технологическими режимами на этапе финишного шлифования с учетом технологической наследственности.

7. Промышленное использование результатов диссертационной работы на ОАО "Новосибирский стрелочный завод" позволило повысить износостой-



кость деталей технологической оснастки вырубного-пробивного штампа на 15%. Полученный годовой экономический эффект составляет 1,4 млн. руб.

8. Результаты исследований использованы в учебном процессе при подготовке студентов по специальностям 260601—"Машины и аппараты пищевых производств" и 151002—"Металлообрабатывающие станки и комплексы".

**Основные положения диссертации опубликованы в работах:  
в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ:**

1. Чёсов Ю. С., Зверев Е. А. Исследование износостойкости покрытий, нанесенных методом плазменного напыления // Научный вестник НГТУ. – 2008. – № 3(32). – С. 175–181.

2. Чёсов Ю. С., Зверев Е. А., Плохов А. В. Структура плазменных износостойких покрытий из порошкового материала марки ПГ-С27 // Обработка металлов. – 2010. – № 1(46). – С. 14-18.

3. Чёсов Ю. С., Зверев Е. А., Плохов А. В. Эксплуатационные свойства плазменных покрытий из износостойкого порошкового материала марки ПГ-С27 // Обработка металлов. – 2010. – № 2(47). – С. 8-12.

4. Особенности микроструктуры износостойких плазменных покрытий / С. В. Веселов, Ю. С. Чёсов, Е. А. Зверев, П. В. Трегубчак, В. В. Базаркина, В. С. Ложкин // Обработка металлов. – 2010. – № 4(49). – С. 35-37.

5. Шероховатость поверхности износостойких покрытий после финишной механической обработки / Ю. С. Чёсов, Е. А. Зверев, А. И. Попелюх, П. В. Трегубчак // Обработка металлов. – 2011. – № 1(50). – С.12 -14.

**публикации в других изданиях**

6. Птицын С. В., Чёсов Ю. С., Зверев Е. А. Установка для плазменного нанесения покрытий // Сборник научных трудов НГТУ. – Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 2006. – № 4(46). – С. 67-72.

7. Чёсов Ю. С., Зверев Е. А. Технология плазменного нанесения покрытий при изготовлении ампульных скарификаторов // Сборник научных трудов НГТУ. – Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 2007. – № 2(48). – С. 81-86.

8. Зверев Е. А., Антохина Н. В., Прокопьев Н. Л. Современные производственные методы нанесения плазменных покрытий // Обогащение минерального сырья. Процессы и оборудование : материалы 5-й международной науч.-практ. конф., 24-26 ноября 2007 г. – Новосибирск: Изд-во ООО "Сибпринт", 2007. – С. 190-193.

9. Чёсов Ю. С., Зверев Е. А., Прокопьев Н. Л. Анализ влияния параметров процесса плазменного напыления на качество покрытий // Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе : материалы 6-й Всероссийской науч.-практ. конф., 28 марта 2008 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – С. 71-75.

10. Зверев Е. А. Влияние режимов струйно-абразивной обработки на шероховатость поверхности деталей под плазменное напыление // Сборник научных трудов НГТУ. – Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 2008. – № 2(52). – С. 109-114.

11. Чёсов Ю. С., Зверев Е. А., Трегубчак П. В. Анализ сравнительных характеристик методов восстановления деталей // Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе : материалы 7-й Всероссийской науч.-практ. конф., 25 марта 2009 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – С. 6-9.

12. Исследование износостойкости покрытий при плазменном напылении / Ю. С. Чёсов, Е. А. Зверев, Н. Л. Прокопьев, А. С. Ваганов, Н. В. Антохина // Ресурсосберегающие технологии ремонта, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня. В 2 ч. : материалы 11-й международной науч.-практ. конф., 14-17 апреля 2009 г. – СПб.: Изд-во СПбПУ, 2009. – Ч.1. – С. 181-186.

13. Чёсов Ю. С., Зверев Е. А. Влияние технологических факторов плазменного напыления на свойства покрытий из порошкового материала марки ПГ-С27 // Обработка металлов. – 2009. – № 3(44). – С. 15-17.

14. Исследование свойств структуры покрытий, нанесенных методом плазменного напыления / Ю. С. Чёсов, Е. А. Зверев, Н. Л. Прокопьев, П. В. Трегубчак // Современная металлургия начала нового тысячелетия. Сборник научных трудов VI международной науч.-техн. конф., 16-19 ноября 2009 г. – Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2009. – Ч. 1. – С. 104-110.

15. Чёсов Ю. С., Зверев Е. А., Трегубчак П. В. Исследование уровня остаточных напряжений в покрытиях при плазменном напылении // Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе : материалы 8-й Всероссийской науч.-практ. конф., 24 марта 2010 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. – С. 24-28.

16. Чёсов Ю. С., Зверев Е. А., Трегубчак П. В. Плазменное напыление износостойких покрытий // В мире научных открытий. – Красноярск: Изд-во ООО "Научно-инновационный центр. – 2010. – № 2(08). – Ч. 3. – С. 100-102.

17. Исследование свойств износостойких покрытий из порошкового материала марки ПГ-С27 при плазменном напылении / Ю. С. Чёсов, Е. А. Зверев, Н. Л. Прокопьев, А. С. Ваганов, Н. В. Антохина, А. В. Плохов // Ресурсосберегающие технологии ремонта, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня. В 2 ч. : материалы 12-й международной науч.-практ. конф., 13-16 апреля 2010 г. – СПб.: Изд-во СПбПУ, 2010. – Ч. 1. – С. 201-207.

18. Качество износостойких покрытий, нанесенных методом плазменного напыления / Ю. С. Чёсов, Е. А. Зверев, Н. Л. Прокопьев, П. В. Трегубчак, Н. В. Антохина, А. С. Ваганов // Прогрессивные технологии и оборудование для обогащения рудных и нерудных материалов : материалы 7-ой международной науч.-практ. конф., 27-29 апреля 2010 г. – Новосибирск: Изд-во ООО "Сибпринт", 2010. – С. 171-175.

19. Чёсов Ю. С., Зверев Е. А., Ерохин И. А. Моделирование свойств износостойких покрытий при плазменном напылении // Прогрессивные технологии в современном машиностроении : материалы VI международной науч.-техн. конф., июнь 2010. – Пенза: Изд-во "Приволжский дом знаний", 2010. – С. 15-17.

20. Чёсов Ю. С., Зверев Е. А., Трегубчак П. В. Влияние режимов плазменного напыления на структуру износостойких покрытий // Инновации в машиностроении : материалы I международной науч.-практ. конф., 7-9 октября 2010 г. – Бийск: Изд-во АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 2010 г. – С. 144-147.

21. Чёсов Ю. С., Зверев Е. А., Трегубчак П. В. Влияние режимов абразивного шлифования на шероховатость поверхности плазменных покрытий // Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе : материалы 9-й Всероссийской науч.-практ. конф., 16 марта 2011 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – С. 16-20.

22. Микроструктура износостойких порошковых покрытий из высокохромистого чугуна, нанесенных методом плазменного напыления / Ю. С. Чёсов, Е. А. Зверев, А. С. Ваганов, П. В. Трегубчак, Н. В. Антохина // Ресурсосберегающие технологии ремонта, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня. В 2 ч. : материалы 13-й международной науч.-практ. конф., 12-15 апреля 2011 г. – СПб.: Изд-во СПбПУ, 2011. – Ч.1. – С. 258-261.

23. Технологическое обеспечение качества износостойких покрытий из высокохромистого чугуна / Ю. С. Чёсов, Е. А. Зверев, П. В. Трегубчак, В. С. Внуков // Инновации в машиностроении. Труды 2-й международной науч.-практ. конф., 6-8 октября 2011 г. – Кемерово: Изд-во КузГТУ, 2011. – С. 457-462.

Отпечатано в типографии Новосибирского  
государственного технического университета  
630092, г. Новосибирск, пр. К. Марка, 20, тел. 346-08-57  
Формат 60×84/16, объем 1,25 п.л., тираж 90 экз.,  
Заказ №1777, подписано в печать 17.11.2011 г.