

На правах рукописи

Верхорубов Вадим Сергеевич

**ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМЕННОГО ОПЛАВЛЕНИЯ
НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МЕТАЛЛИЗАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ
СИСТЕМЫ Fe-C-Cr-Ti-Al**

05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2015

Работа выполнена на кафедре технологии сварочного производства
ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Коробов Юрий Станиславович

Официальные оппоненты: **Еремин Евгений Николаевич**,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Омский государственный
технический университет», заведующий кафедрой
«Машиностроение и материаловедение»;

Вопнерук Александр Александрович,
кандидат технических наук,
ООО «Совместное предприятие ”Мишима-
Машпром“», главный инженер – руководитель
проекта

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт металлургии
Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург

Защита состоится «04» февраля 2016 г. в 16:00 ч на заседании
диссертационного совета Д 212.285.10 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский
федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по
адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ
ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина», <http://dissovet.science.urfu.ru/news2/>

Автореферат разослан «_____» _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук

Е.Ю. Раскатов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Абразивный износ является одним из основных факторов, ограничивающих ресурс работы деталей, узлов машин и оборудования различного назначения.

С целью повышения абразивной износостойкости применяют различные методы обработки рабочей поверхности. Перспективным направлением создания защитных покрытий, является дуговое напыление, но металлизационное покрытие быстро разрушается под воздействием абразива, в результате микрорезания и отслоения его частиц с недостаточной когезионной прочностью.

Для устранения указанных недостатков металлизационных покрытий по критериям стоимости и производительности предпочтительно использование последующей плазменной обработки.

Однако влияние плазменного поверхностного оплавления на свойства напыленных покрытий на основе железа и процесс распространения тепла в композиции «покрытие – основа» изучены недостаточно, что затрудняет применение данной технологии. Для определения влияния параметров режима плазменной обработки на свойства напыленного покрытия после оплавления удобно воспользоваться таким инструментом, как математическое моделирование, позволяющее определить распределение температур в композиции, термический цикл обработки и скорости нагрева и охлаждения материала.

К деталям подверженным интенсивному износу в процессе эксплуатации, в частности, относятся рабочие органы почвообрабатывающих машин. На интенсивность изнашивания таких орудий оказывают влияние однородность, влажность и плотность почвы, форма и скорость движения рабочих органов, а также материалы из которых они изготовлены. Годовые затраты на поддержание исправного состояния сельскохозяйственной техники составляют (млрд. руб.): 1,2 для плугов, 2,5 для культиваторов и 2,7 для сеялок. Высокие скорости износа лемехов и потребность в них колхозов, а также простота их монтажа/демонтажа на плуг делают их идеальным объектом для проведения натуральных испытаний.

Степень разработанности темы исследования

Проблемам улучшения характеристик напыленных покрытий путем последующей обработки высококонцентрированными источниками нагрева посвящены труды В.Н. Анциферова, М.А. Геллера, Д.В. Губарькова, В.А. Клименова, А.А. Митрофанова, А.В. Похмурской, Н.В. Спиридонова, Е. Chikarakara, Chong Cui, Shi-Hong Zhang, Qun Wang, B.S. Yilbas. Их работы в значительной мере способствовали изучению влияния последующей термической обработки на свойства газотермических покрытий. Однако в трудах этих ученых не рассматривается влияние плазменной обработки на характеристики покрытий из экономнолегированных сплавов.

Цель работы заключается в изучении влияния плазменного оплавления на повышении абразивной износостойкости покрытий системы Fe-C-Cr-Ti-Al, полученных дуговой металлизацией.

Для достижения намеченной цели в процессе выполнения работы были решены следующие **задачи**:

- разработана модель тепловых процессов в системе «неоднородное покрытие – сплошное тело» под воздействием высококонцентрированного источника нагрева, применительно к плазменной обработке, с целью определения параметров режима;
- определены закономерности влияния плазменной обработки на характеристики структуры и их связь с физико-механическими и служебными свойствами покрытий системы Fe-C-Cr-Ti-Al;
- на основе полученных данных разработана технология плазменного оплавления металлизационных покрытий на основе железа для повышения их абразивной износостойкости, применительно к рабочим органам сельскохозяйственной техники, для продления их срока службы.

Методы исследования

В теоретических исследованиях использовали численный эксперимент, проведённый с использованием разработанной автором модели, выполненной в пакете MathCad 14. Экспериментальные исследования выполнены по стандартным методикам, на сертифицированном оборудовании, и включали в себя: элементный анализ, сканирующую электронную микроскопию, рентгеноструктурный фазовый анализ, волнодисперсионный и энергодисперсионный микрорентгеноспектральный анализ, фотоэлектрический спектральный метод, замеры микротвердости, механические испытания по определению абразивной износостойкости по закреплённому абразиву. Для подтверждения результатов исследования проведены эксплуатационные испытания рабочих органов почвообрабатывающих машин, упрочнённых по разработанной технологии.

Научная новизна работы

- разработана модель распространения тепла в системе «неоднородное покрытие – сплошное тело», под воздействием плазменного источника нагрева, с учетом параметров режима плазменной обработки, а также влияния пористости и оксидных прослоек на теплофизические свойства покрытий;
- на основе анализа расчетов, полученных при моделировании, установлен характер зависимости геометрических размеров зоны оплавления от параметров режима плазменной обработки, а также влияние химического состава и неоднородности покрытий на их теплофизические характеристики;
- установлено, что износостойкость металлизационных покрытий после плазменного оплавления в 2 раза выше чем у наплавленных слоев того же состава, что связано с полным окислением алюминия и титана, способствующим образованию структуры мартенсита с упрочнением дисперсными карбидами хрома.

Теоретическая и практическая значимость работы

На основе разработанной математической модели создан программный комплекс, позволяющий оценить влияние параметров режима плазменной обработки на структурные и геометрические параметры зоны оплавления в композиции «металлизационное покрытие – основа». Установлено влияние плазменного оплавления на структурные и физико-механические характеристики металлизационного покрытия системы Fe-C-Cr-Ti-Al. На основе полученных данных разработана технология плазменного оплавления металлизационных покрытий, по которой упрочнены опытные рабочие органы почвообрабатывающих машин, успешно прошедшие эксплуатационные испытания.

Основные положения, выносимые на защиту

- модель процесса плазменного оплавления металлизационного покрытия, описывающая влияние параметров режима обработки на геометрию и структурные характеристики оплавленной зоны;
- результаты исследования физико-механических и служебных свойств металлизационных покрытий из порошковой проволоки системы легирования типа Fe-C-Cr-Ti-Al до и после плазменного оплавления;
- технология плазменного оплавления металлизационного покрытия, обеспечивающая значительное повышение абразивной износостойкости, применительно к рабочим органам почвообрабатывающих машин.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность расчетов, выполненных по разработанной модели, подтверждается экспериментальными данными, полученными по верифицированным методикам и обладает достаточной точностью для оценки области рациональных параметров режима плазменной обработки. Достоверность лабораторных исследований полученных покрытий подтверждена на практике в ходе эксплуатационных испытаний.

Основные результаты работы были доложены и обсуждены на региональных, всероссийских и международных конференциях по сварке и родственным технологиям: 12, 13 и 14 научно-технических конференциях «Сварка. Контроль и диагностика» (Екатеринбург, 2012, 2013, 2014); национальной научно-технической конференции (Москва, 2012); VI Уральской научно-практической конференции «Сварка. Реновация. Триботехника.» (Н. Тагил, 2013); международной научно-технической конференции «Сварка и контроль» (Пермь, 2013); международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы прочности» (Екатеринбург, 2013); международной конференции «Сварка и родственные технологии – настоящее и будущее» (Украина, Киев, 2013); всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Инженерная мысль машиностроение будущего» (Екатеринбург, 2013); всероссийской научно-практической конференции «Современные наукоемкие инновационные технологии» (Самара, 2014); всероссийской (с международным участием) научно-практической

конференции «Актуальные проблемы современной науки и техники» (Пермь, 2015); научно-практической конференции с международным участием «Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершённых фундаментальных исследований и НИОКР» (Екатеринбург, 2015).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 12 работ, в том числе 4 публикации в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов по каждой главе, общих выводов по работе, библиографического списка из 112 наименований и 4 приложений. Работа изложена на 122 страницах печатного текста, включает 46 рисунков и 19 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы ее цель и основные задачи, приведены научная новизна, практическая значимость работы и вопросы, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены основные виды износа и механизмы разрушения рабочих поверхностей. Показано, что для многих типовых условий работы деталей машин самым распространенным видом изнашивания является абразивное.

Наиболее экономичным и производительным методом создания защитных покрытий является дуговая металлизация, а использование в качестве напыляемого материала порошковых проволок, позволяет в широких пределах варьировать систему легирования покрытий, придавая им те или иные характеристики. В качестве материала для нанесения износостойких покрытий широкое распространение получили экономнолегированные порошковые проволоки системы Fe-C-Cr-Ti-Al, разработанные в Уральском институте сварки. Однако, условия формирования газотермических покрытий обуславливают получение ламеллярно-пористой структуры приводящей к пониженной стойкости покрытий против абразива, в сравнении с однородной структурой наплавок.

С целью устранения недостатков напыленных покрытий применяются различные методы последующей обработки. Наибольшей эффективностью обладает оплавление высококонцентрированными источниками нагрева. С точки зрения технико-экономических показателей, наиболее перспективно применение плазменной дуги, что подтверждается стоимостью оборудования и производительностью процесса обработки.

Показано, что многие физические процессы при оплавлении металлизационных покрытий на основе железа не известны, что затрудняет определение режимов плазменной обработки. С этой целью рационально применение модели, основанной на решении краевой задачи теплопроводности, для двухслойного материала, методом функции Грина.

В качестве объекта применения результатов исследования целесообразно использовать рабочие органы почвообрабатывающих машин. Во-первых, в условиях их работы реализован механизм абразивного изнашивания, что позволяет перенести результаты на другие области применения. Во-вторых, интенсивный износ в процессе эксплуатации позволяет провести испытания в короткие сроки.

Во второй главе для определения влияния параметров режима плазменной обработки на геометрию оплавленной зоны, а также, для прогнозирования свойств покрытия после оплавления решали задачу распространения тепла в системе «неоднородное покрытие – сплошное тело» от высококонцентрированного источника нагрева.

Знание распределения температурных полей, в двухслойном материале, позволит описать физическую сущность распространения тепла в композиции, определить влияние пористости и состава покрытия, скорости нагрева и охлаждения материалов композиции, а значит, даст возможность спрогнозировать структурные и фазовые превращения в покрытии и в конечном итоге проанализировать их стойкость к абразивному износу.

Решение задачи теплопроводности выполняли методом функции Грина.

Для описания процессов распространения тепла в двухслойном материале, рассмотрена схема плоского слоя, с переменными по толщине теплофизическими свойствами. Следовательно, математическая постановка задачи имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial T_1}{\partial t} = a_1 \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \right), 0 < z < h \\ \frac{\partial T_2}{\partial t} = a_2 \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \right), h < z < L \end{cases}, \quad (1)$$

где $a = \lambda / c\rho$ – коэффициент температуропроводности ($\text{м}^2/\text{с}$).

Такая постановка задачи аналогична граничным условиям IV рода.

Потоки плазмообразующего и защитного газов обуславливают на поверхности пластины конвективный теплообмен с окружающей средой. Следовательно, на поверхности покрытия ($z = 0$) зададим граничные условия III рода, тогда уравнение теплопроводности примет следующий вид:

где $bT(x, y, z, t)$ – количество тепла, отдаваемое единицей объема в единицу времени в окружающую среду; b – коэффициент теплоотдачи, $1/\text{с}$.

$$b = \frac{2\alpha}{c\rho L}, \quad (3)$$

где L – толщина пластины; α – коэффициент теплоотдачи, в общем случае он отражает совместное действие (α_k) конвекции и излучения (α_p): $\alpha = \alpha_k + \alpha_p$.

Будем считать, что обрабатываемая пластина с покрытием лежит на поверхности, плохо проводящей тепло, т.е. тепловой поток в ограждающую конструкцию равен нулю (адиабатная граница), а, значит, нижнюю границу ($z = L$) зададим граничными условиями II рода:

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} = 0, \quad (4)$$

Для описания плазменного источника нагрева используем функцию подвижного непрерывно действующего точечного источника нагрева:

$$P(x', y', z', \tau) = \frac{q}{c\rho} \delta(x)\delta(y)\delta(z)E(\tau), \quad (5)$$

Таким образом, решение данной задачи методом функции Грина примет следующий вид:

$$T(x, y, z, \tau) = \frac{q}{8c\rho(\sqrt{\pi a})^3} \int_0^\tau \frac{1}{(\sqrt{\tau + t_0})^3} \exp\left(\frac{(x - V(\tau + t_0))^2 + (y)^2}{4a(\tau + t_0)} - b(\tau + t_0)\right) \times \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ \exp\left(\frac{(z + 2nL)^2}{4a(\tau + t_0)}\right) + \exp\left(-\frac{(z + 2nL)^2}{4a(\tau + t_0)}\right) \right\}, \quad (6)$$

где $t_0 = 1 / 4ak$ – длительность распространения фиктивного источника; k – коэффициент сосредоточенности нормально-кругового источника.

Для оценки влияния параметров режима плазменной обработки расчет коэффициента сосредоточенности определяли по эмпирической зависимости:

$$k = 875 \frac{G_0^{0.2} (1 + 0.06l)}{I^{0.64} h^{0.46} d_c^{0.26}}, \quad (7)$$

где G_0 – расход газа, г/с; I – сила тока дуги, А; l и d_c – размеры канала сопла, мм; h – расстояние от среза сопла до нагреваемой поверхности, мм.

Для расчета эффективной теплопроводности материала покрытия с учетом влияния оксидных прослоек и пористости, воспользуемся формулой:

где $\lambda_M, \lambda_B, \lambda_{\Sigma MeO}$ – теплопроводности металла, воздуха и оксидных прослоек в покрытии соответственно, Вт/м·°С; P – пористость, %; V – содержание оксидных прослоек, %.

Теплофизические свойства оксидов в шлаке $X_{\Sigma MeO}$ определены по аддитивной зависимости:

где X_{MeO} – теплофизическая характеристика (λ, c, ρ) i -того оксида типа MeO; V_{MeO} – доля участия i -того оксида в шлаке.

Расчет теплоемкости и плотности покрытия проведем по следующим зависимостям:

$$c = c_M \cdot (1 - P - V) + c_B \cdot P + c_{\Sigma MeO} \cdot V, \quad (11)$$

Расчет теплофизических характеристик металла покрытия из расплаиваемых проволок выполнили по эмпирическим зависимостям от процентного содержания легирующих элементов в покрытии:

$$\lambda = \frac{1}{20} (11 - 7\sqrt[4]{\sigma}); \quad c\rho = \frac{1}{10} (55 - 9\sqrt[4]{\sigma}), \quad (12)$$

где σ – коэффициент зависящий от содержания легирующих элементов

$$\sigma = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{3} \left(C + \frac{1}{5} (Ni + Co + Cu + \frac{W}{3}) \right) + \frac{Mn}{14} + \frac{Si + Al}{7} + \frac{Cr + V + Ti}{13} + \frac{Mo + Nb + Zr}{24} \right), \quad (13)$$

В качестве исследуемых материалов для нанесения покрытий рассмотрены экономнолегированные порошковые проволоки систем 150X8T2Ю (ППМ-6) и 80X22T2Ю2 (ППМ-8), применяемые для нанесения износостойких покрытий. В качестве материала основы использовали среднеуглеродистую сталь 40. Теплофизические характеристики покрытия, с учетом его пористости, выгорания легирующих элементов и наличия оксидных прослоек, рассчитанные по формулам (8–13), а также значения характеристик для основы представлены в таблице 1.

Результаты расчётов показали, что повышение пористости значительно снижает теплопроводность покрытия, что уменьшает эффективность плазменного нагрева. Так, например, увеличение пористости покрытия на 1 % приводит к снижению теплопроводности покрытия на 6 %.

Таблица 1 – Теплофизические характеристики покрытия и основы

Материал	λ , Вт/м·°С	c , Вт/кг·°С	ρ , кг/м ³	T_n , °С	$T_{нар}$, °С
Сталь 40	34	481	7850	1510	2735
ППМ-6	23,2	682	7115	1401	
ППМ-8	20,1	669	7115	1436	

В результате расчетов в полученной модели построен график зависимости глубины проплавления подложки от погонной энергии плазменной обработки, при различных значениях толщины напыленного покрытия (рисунок 1). При разной толщине покрытий, наблюдается пропорциональный рост глубины проплавления от погонной энергии, однако с увеличением толщины покрытия наблюдается повышение среднего значения погонной энергии, необходимой для проплавления.

Влияние параметров режима плазменной обработки на коэффициент формы проплавления показано на рисунке 2.

На основе полученных данных о влиянии параметров режима плазменной обработки, подобраны рациональные режимы оплавления покрытий из рассматриваемых ПП (таблица 2). Распределения температурных полей, полученных в результате расчётов, при выбранных режимах обработки представлены на рисунке 3.

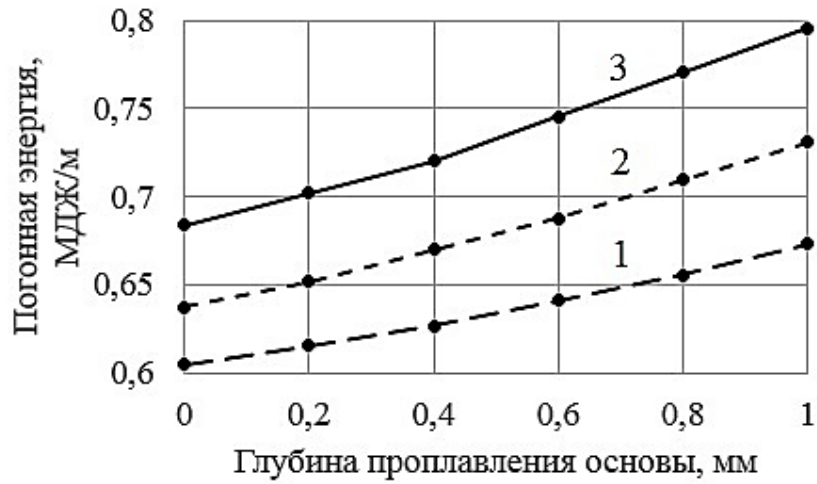
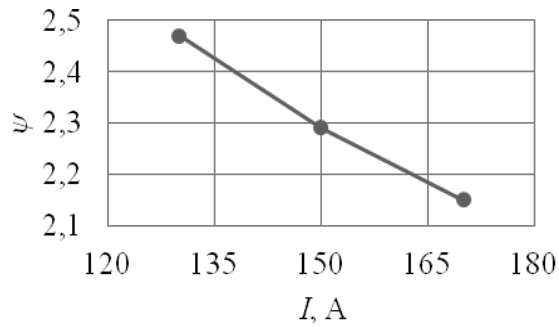
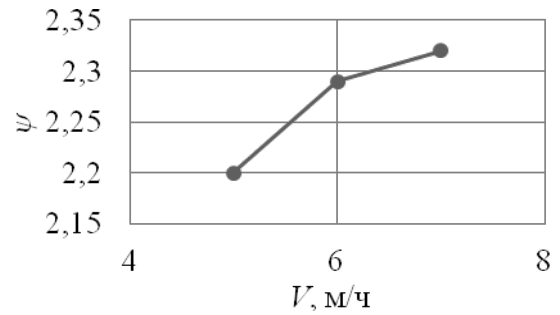


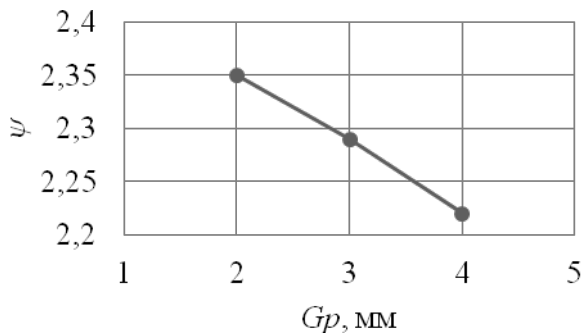
Рисунок 1 – Зависимость глубины проплавления подложки от погонной энергии, при различной толщине покрытия: 1 – 1 мм; 2 – 1,5 мм; 3 – 2 мм



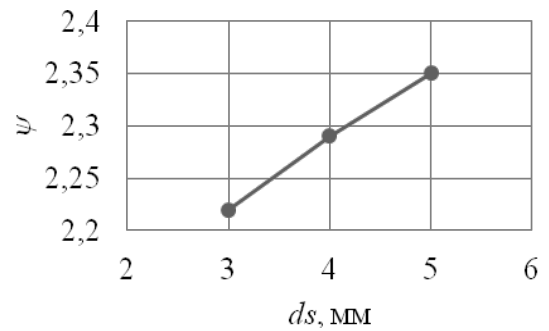
a



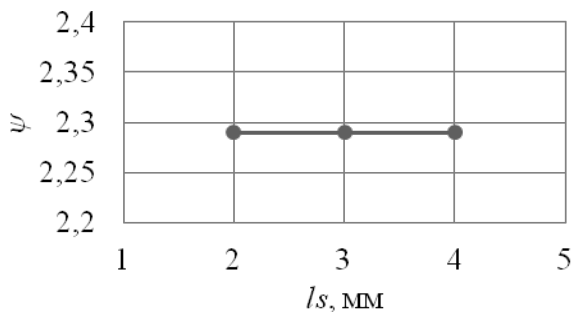
б



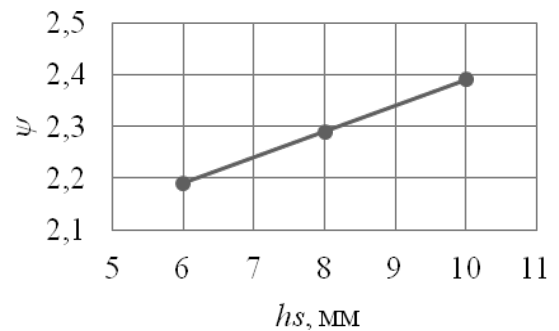
в



з



д



е

Рисунок 2 – Зависимость коэффициента формы проплавления от:
a – I , А; *б* – V , м/ч; *в* – G_p , л/мин; *з* – ds , мм; *д* – ls , мм; *е* – hs , мм

Таблица 2 – Расчетные параметры режима плазменной обработки

Покрытие	q_p , МДж/мм	d_s , мм	l_s , мм	h_s , мм	G_p , л/мин
ППМ-8	0,67	4	2	6	2,5
ППМ-6	0,67	4	2	8	2,5

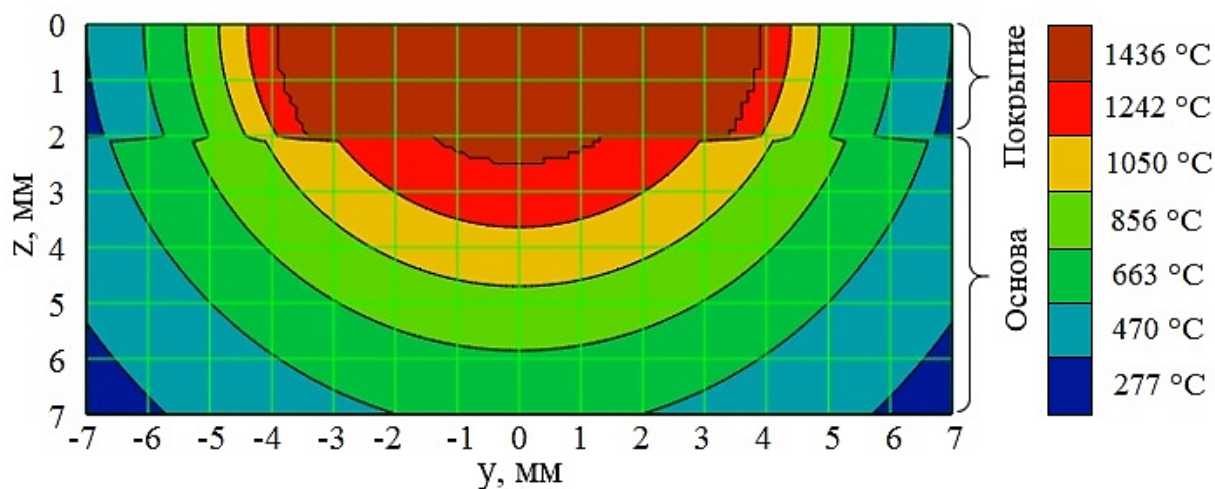


Рисунок 3 – Распределение температурных полей при обработке на выбранных режимах

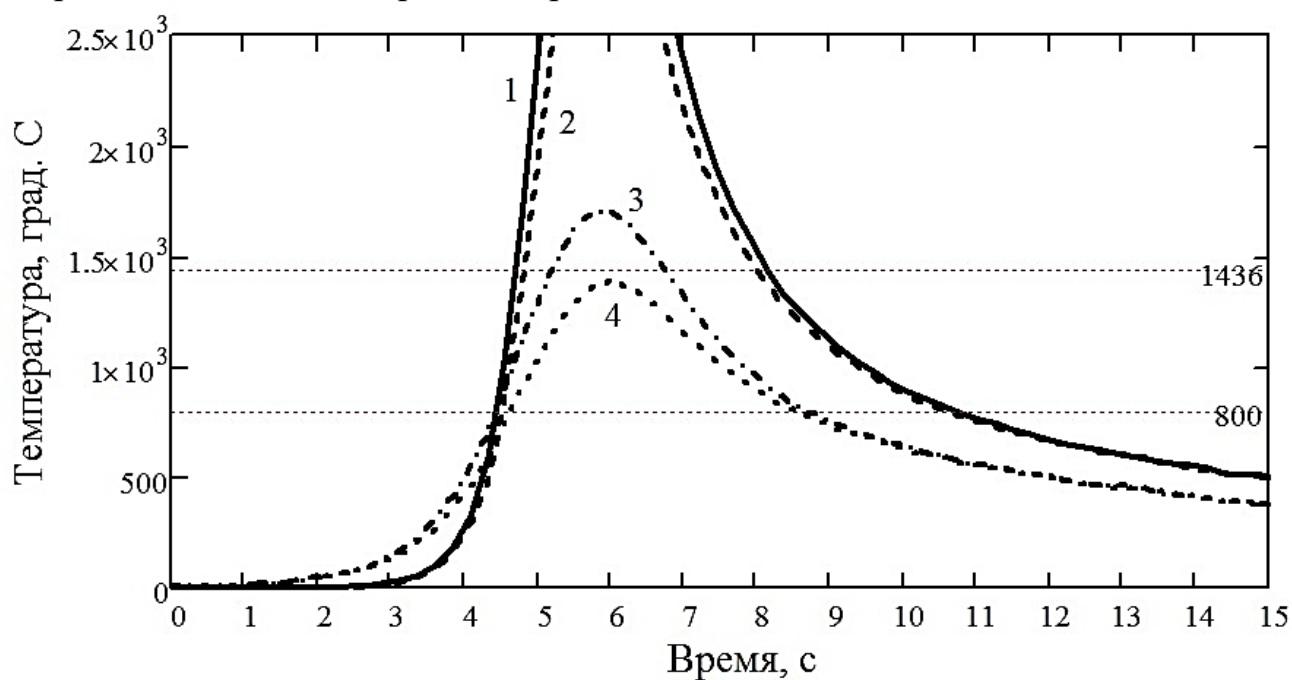
Оценка достоверности предложенной модели при сравнении расчётных коэффициентов формы проплавления с опытными данными приведена в главе 3.

Для прогнозирования структурных превращений в оплавленной зоне необходимо оценить время пребывания металла в расплавленном состоянии, а также скорости нагрева и охлаждения. Для этого, используя полученную модель, построили графики термического цикла T и мгновенных скоростей нагрева и охлаждения W при плазменной обработке, для точек, расположенных в начальный момент времени на расстоянии 25 мм от источника нагрева.

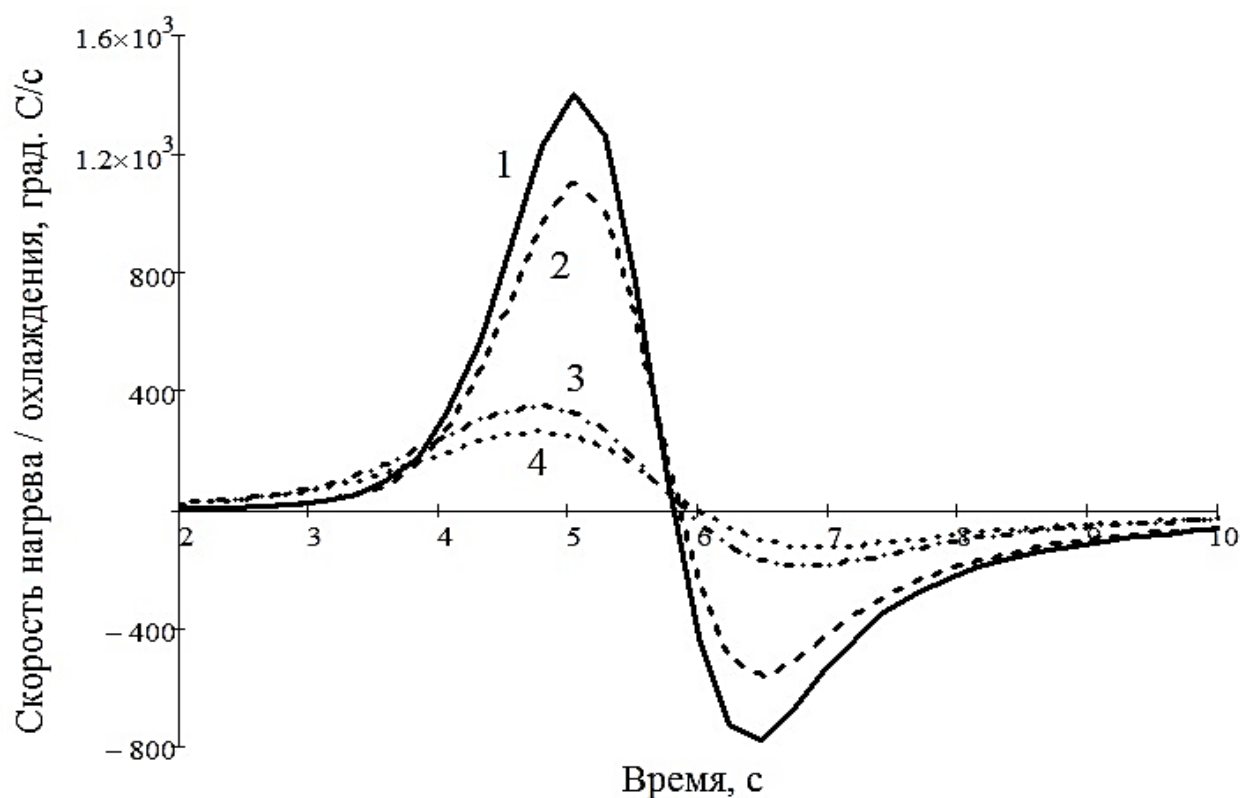
На графике (рисунок 4, а) видно, что термические циклы для покрытия и подложки сильно отличаются. Температура подложки (кривые 3, 4) начинает возрастать на 1,5 секунды раньше температуры покрытия (кривые 1, 2), что связано с ее большей теплопроводностью. Однако, по мере приближения источника нагрева к рассматриваемым точкам, покрытие нагревается значительно быстрее и сильнее чем подложка, вплоть до температуры кипения. Такая зависимость хорошо иллюстрируется графиком распределения температур вдоль оси X (рисунок 5).

В первом приближении кристаллизующийся переплавленный металл покрытия можно представить, как квазиравновесную систему, в которой фазовые превращения в процессе охлаждения происходят в последовательности, определяемой с помощью вертикального разреза диаграммы состояния Fe-C-Cr при 8 % Cr для ППМ-6 и 22 % Cr для ППМ-8,

естественно, с отклонением от равновесной в тем большей степени, чем больше скорость охлаждения в процессе кристаллизации.



a



б

Рисунок 4 – Графики термического цикла обработки (*a*), скоростей нагрева и охлаждения (*б*) точек, расположенных на разной глубине композиции от поверхности покрытия:

1 – 0 мм (поверхность покрытия); 2 – 2 мм (покрытие); 3 – 2,1 мм (поверхность подложки); 4 – 4 мм (подложка)

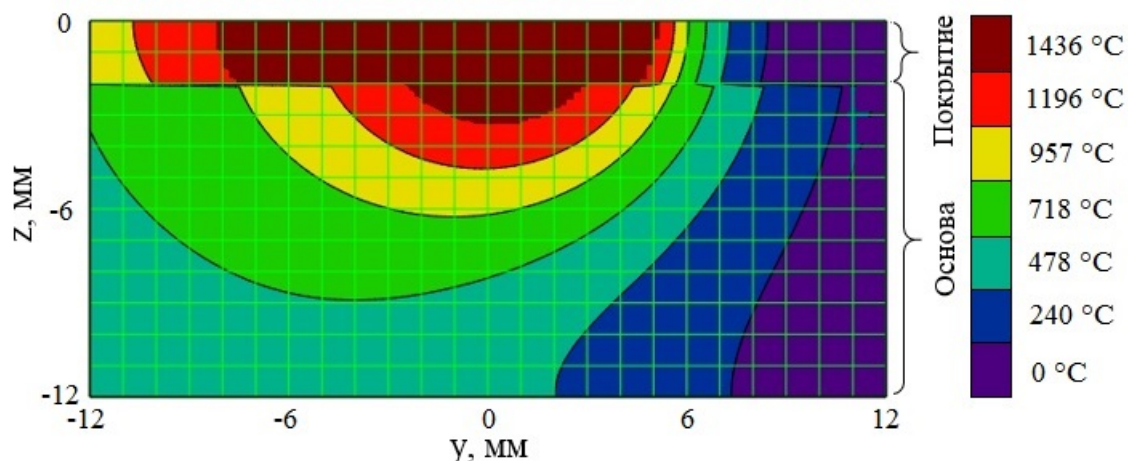


Рисунок 5 – Распределение изотерм в плоскости XOZ

При оплавлении покрытий на основе ПП ППМ-6 в первую очередь образуются кристаллы аустенита дендритной морфологии, между осями которых кристаллизуется эвтектика аустенит + карбид типа M_7C_3 , в областях твердого раствора (аустенита), обогащенных углеродом и хромом, в соответствии с разрезом диаграммы состояния, на ряду с карбидом типа M_7C_3 , возможно образование вторичных карбидов $M_{23}C_6$. В процессе последующего охлаждения, в зависимости от его скорости, в твёрдом состоянии развивается процесс выделения избыточных карбидов и происходит мартенситное превращение переохлаждённого аустенита, т.к. скорость охлаждения оказывается выше критической для твёрдого раствора, легированного хромом. Таким образом, в процессе кристаллизации ожидается получение структуры мартенсита, пластинчатой морфологии, расположение которых наследуют дендриты аустенита, окруженные сеткой карбидной эвтектики.

Характер и последовательность фазовых превращений в процессе охлаждения оплавленного металла при плазменном воздействии на покрытие из ППМ-8 и ППМ-6 принципиально аналогичны с некоторыми различиями в температурах и объёме фазовых превращений и морфологии структурных составляющих, образующихся в той же последовательности. Так, твёрдый раствор в покрытии ППМ-8 содержит больше хрома, чем в ППМ-6, а количество образующей эвтектики соответственно меньше, следовательно, количество образовавшегося мартенсита будет больше. После выделения карбидов в переплавленном металле напылённого покрытия ППМ-8 в аустените содержится по расчёту примерно вдвое меньше углерода и большее количество хрома, по сравнению с ППМ-6. Таким образом, ожидается, что кристаллы среднеуглеродистого мартенсита в переплавленном покрытии ППМ-8, обеспечат высокий уровень твёрдости и износостойкости, сохраняя более высокую трещиностойкость, чем высокоуглеродистый мартенсит в покрытии из ППМ-6.

В третьей главе исследовали зависимость структуры, физико-механических и служебных свойств металлизационных покрытий до и после

плазменного оплавления на режимах, выбранных в результате моделирования тепловых процессов в композиции «покрытие – основа».

Покрyтия толщиной 1,7–2 мм, из ПП марки ППМ-8, наносили на стальные пластины размерами 240×70×10 мм после струйно-абразивной обработки с помощью аппарата активированной дуговой металлизации (АДМ) на следующих режимах: ток – 200 А; напряжение – 28 В; дистанция напыления – 100 мм; скорость перемещения аппарата относительно напыляемой детали – 0,1 м/с; давление воздуха – 0,3 Мпа; давление пропана – 0,32 Мпа.

Для осуществления плазменного оплавления металлизационных использовали установку для плазменной обработки, включающую универсальный наплавочный станок У-653, плазмотрон с тангенциальной системой подачи газа (аргона), блок управления плазмотроном и источник питания ВД-306Ф. Параметры режима плазменной обработки, выбраны согласно расчетам по разработанной модели (таблица 2).

Для сравнения свойств покрытий после плазменного оплавления с наплавленным металлом выполнили аргонодуговую наплавку исследуемой ПП. Наплавку выполняли в двух вариантах: 1 слой и для уменьшения влияния перемешивания с основным металлом в 3 слоя. Режимы наплавки – ток 170 А, напряжение 34 В. Наплавку слоев выполняли непрерывно, без охлаждения слоев.

Для проведения исследований, из пластин после напыления, оплавления и наплавки, на электроэрозионном проволочно-вырезном станке AGIE CHARMILLES CUT 20 вырезали образцы размерами 10×10 мм. Подготовку поперечных шлифов металлизационных покрытий до и после плазменного оплавления выполняли на станке Laborol с использованием пасты ГОИ № 2 и алмазной пасты НОМ 60/40. Травление образцов осуществляли царской водкой.

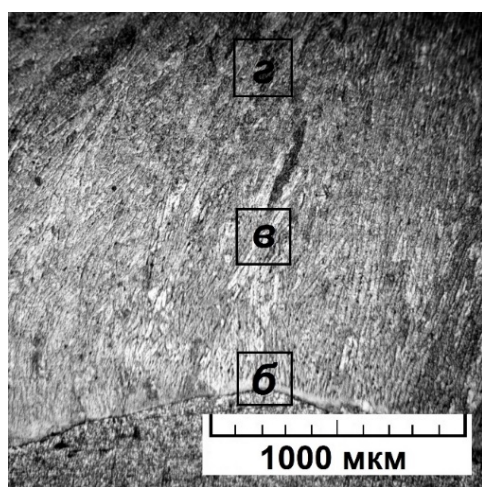
Фазовый состав покрытий определяли на рентгеновском дифрактометре Bruker D8 Advance в Cr- k_{α} излучении. Структуру и микрохимический состав покрытий изучали на оптическом микроскопе ЛабоМет-3 и сканирующем электронном микроскопе VEGA II XMU. Микротвердость по их сечению измеряли на микротвердомере Shimadzu HNV-G21DT при 0,5 Н (50 гс) и 3 Н (300 гс).

Износостойкость определяли для образцов металлизационных покрытий до и после плазменного оплавления, а также наплавленных слоев путем совершения возвратно-поступательных движений по шлифовальной бумаге на основе электрокорунда. Путь трения образца за одно испытание при скорости движения 0,158 м/с устанавливали равным 60 м. Нормальную удельную нагрузку на образец установили равной 10 кг. Длина одного рабочего хода образцов составляла 0,125 м, с шагом образца за один рабочий ход – 0,0012 м. Показатель износостойкости покрытий, равный отношению изменений массы эталона и образца, определяли по результатам трех испытаний. В качестве эталона принимали металлизационное покрытие до плазменного оплавления.

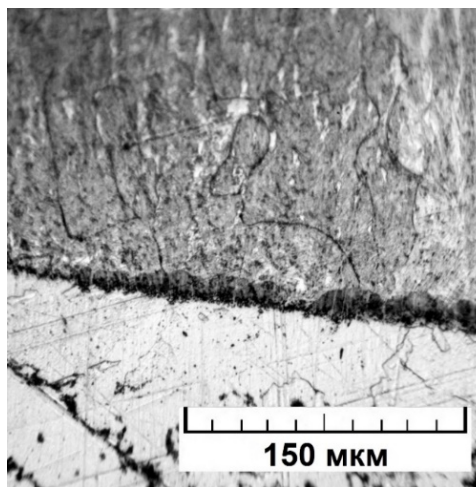
Металлизационное покрытие имеет, характерную для всех видов напыления, lamellarно-пористую структуру. Толщина покрытия составляет 1840 мкм.

Плазменная обработка напыленного покрытия привела к его полному переплаву и устранению структурных неоднородностей. Толщина переплавленного покрытия составляет 2380 мкм.

Металлографическое изучение шлифов показало, что зона сплавления и ЗТВ оплавленного покрытия имеют типичный для наплавленных слоев вид (рисунок 6). В прилегающем к оплавленному покрытию слое основного металла наблюдается тонкая (50 мкм) зона обезуглероживания. При большом увеличении по всему сечению покрытия наблюдается структура мартенсита. Структура переплавленного покрытия имеет дендритное строение и состоит из четырёх основных характерных зон в порядке их расположения от основного металла к поверхности оплавления (рисунок 6, а): зона мелких равноосных зерен пакетного мартенсита; зона более крупных равноосных зерен мартенсита, вследствие малой толщины 1 и 2-ой зон их строение показано на рисунке 6, б; основная зона вытянутых столбчатых зёрен (дендритов), ориентированных преимущественно перпендикулярно к поверхности раздела переплавленного и основного металла (рисунок 6, в); верхняя часть переплавленного покрытия (рисунок 6, г), толщиной до 500 мкм, состоит из крупных равноосных зерен мартенсита.



а



б

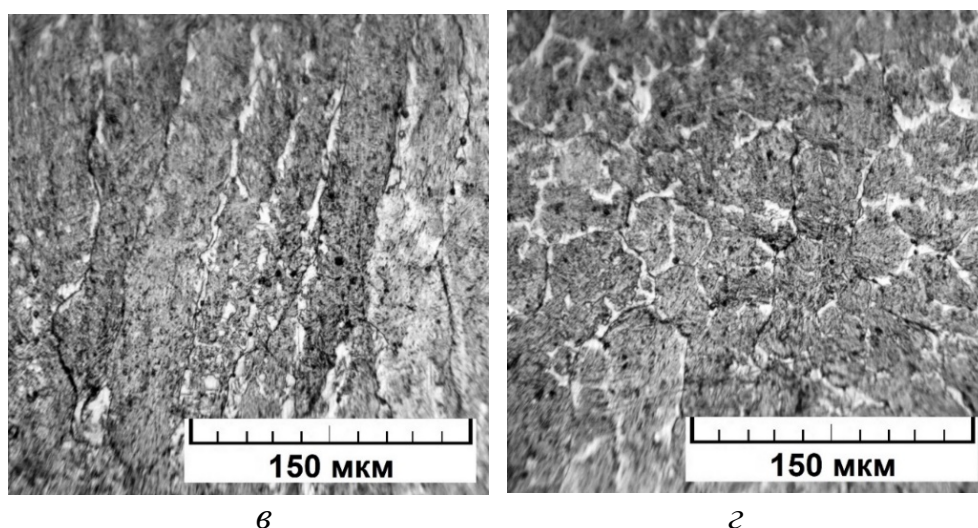


Рисунок 6 – Микроструктура оплавленного покрытия после травления:
а – общий вид, *б* – зоны 1 и 2, *в* – зона 3, *г* – зона 4

Наплавленный металл имеет характерную ячеистую структуру и состоит из легированного феррита с выделившимися по границам зерен крупными частицами упрочняющих фаз. Толщина наплавленного слоя составляет 1,750 мм.

Металл, наплавленный в 3 слоя, имеет структуру без видимых границ между слоями. Толщина покрытия на шлифе составляет 3,95 мм. По толщине покрытия выявлено два участка с различной структурой. Участок 1, представляющий поверхностную часть наплавленного слоя, имеет крупноячеистую структуру и состоит из легированного мартенсита с выделившимися по границам зерен дисперсными частицами упрочняющих фаз. Участок 2 имеет зеренную структуру с зерном различного размера что, вероятно, обусловлено многократным нагревом данного участка в процессе трехслойной наплавки.

Рентгеноструктурный анализ полученных покрытий до и после оплавления показал, что единственной надежно регистрируемой фазой всех покрытий является твердый раствор на основе α -железа. Это подтверждает результаты металлографических исследований.

По результатам микрохимического анализа можно утверждать, что основной фазой покрытия является твердый раствор легирующих элементов на основе Fe, в котором неравномерно распределены оксиды преимущественно типа $(Al, Ti)_2O_3$.

Химические элементы по толщине покрытия распределены практически равномерно, что свидетельствует о том, что основной фазой покрытия является твердый раствор легирующих элементов, главным образом, хрома, в железе. Следует также отметить, что плазменное оплавление привело к полному выгоранию O, Al и Ti. Это можно объяснить тем, что в процессе плазменного оплавления данные элементы активно взаимодействуют с кислородом из оксидных прослоек покрытия и удаляются из ванны в виде шлака.

Однослойная наплавка рассматриваемой порошковой проволоки приводит к получению металла с равномерным распределением легирующих элементов по толщине слоя. Основной фазой покрытия является легированный мартенсит. В ферритной матрице в небольшом количестве распределены дисперсные карбиды Cr и Ti, выделившиеся по границам зерен. Кислород в наплавленном металле отсутствует.

Химические элементы по толщине трехслойной наплавки распределены неравномерно. Верхняя зона характеризуется наибольшим содержанием легирующих элементов. Легирующие элементы, в основном, находятся в твердом растворе на основе железа. Далее, ближе к основе, наблюдается резкое снижение концентрации легирующих элементов. Очевидно, что нижняя зона представляет собой первый наплавленный слой, низкая концентрация элементов в котором, объясняется сильным смешением с основным металлом.

Результаты микрохимического анализа подтверждаются результатами спектрального анализа с поверхности образцов анализа (таблица 3).

Таблица 3 – Химический состав покрытий

Тип покрытия	Содержание элемента, % масс.			
	C	Cr	Al	Ti
АДМ покрытие	0,77	20,04	2,18	1,56
Оплавленное покрытие	0,37	8,91	0,01	0,01
Наплавка в 1 слой	0,50	10,69	0,75	0,99
Наплавка в 3 слоя	0,77	18,620	1,23	1,74

В таблице 4 приведены результаты определения среднего уровня микротвердости напыленных покрытий до и после плазменного оплавления и наплавки в 1 и 3 слоя. Плазменная обработка покрытия привела к его переплавлению и существенному изменению микротвердости (рисунок 7), которая возросла до 800 HV0,3. При этом отмечается ее более равномерное распределение по толщине покрытия, что обусловлено однородной структурой покрытия после оплавления.

Таблица 4 – Средняя микротвердость покрытий

Тип покрытия	Микротвердость	
	HV0,05	HV0,3
АДМ покрытие	460±64	487±50
АДМ покрытие после плазменного оплавления	831±18	753±14
Наплавка в 1 слой	576±18	571±11
Наплавка в 3 слоя	532±19	502±26

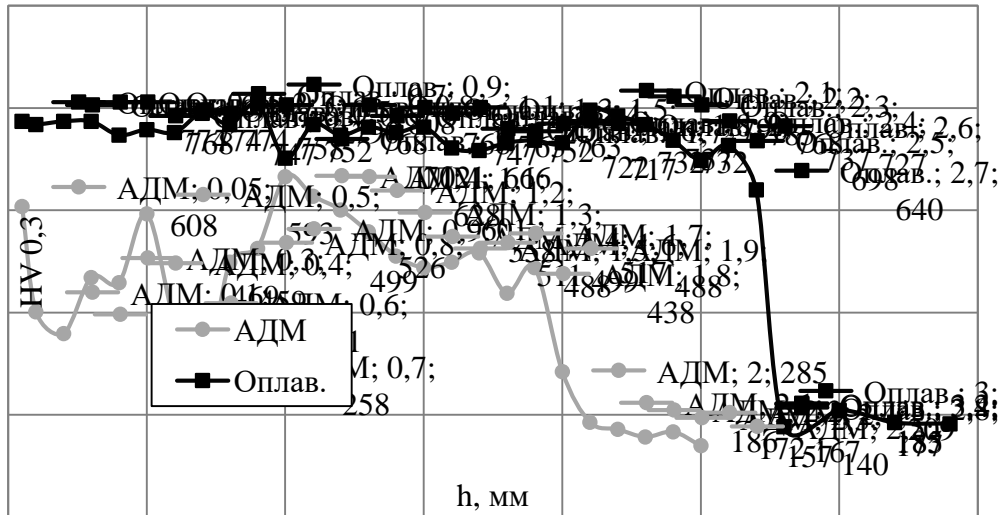


Рисунок 7 – Изменение микротвердости по толщине покрытия в исходном и оплавленном состоянии, при нагрузке на индентор 300 гс

По результатам определения потерь массы образцов после испытаний износостойкости по закрепленному абразиву (рисунок 8) наибольшую износостойкость имеет покрытие после плазменного оплавления (0,1444 г), а наименьшую – исходное металлизационное покрытие (0,3738 г).

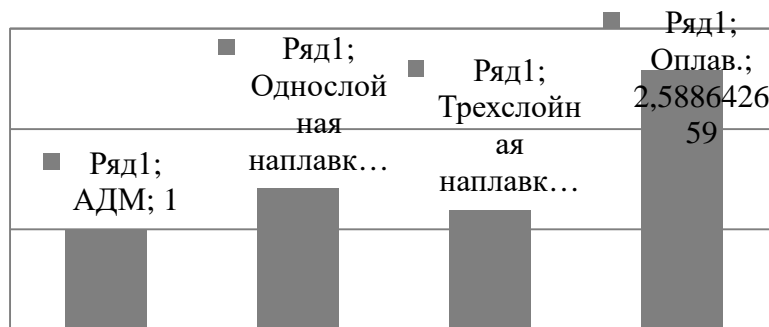


Рисунок 8 – Относительная износостойкость различных видов покрытий при изнашивании по закрепленному абразиву

Пониженная износостойкость металлизационных покрытий до оплавления обуславливается интенсивным отделением его фрагментов, обладающих низкой когезией, при попадании абразивных частиц в относительно мягкие пограничные слои и поры. В тоже время, несмотря на более высокое содержание легирующих элементов в наплавленных слоях, они обладают наименьшей твердостью, вероятно, это связано с высоким содержанием карбидообразующих элементов Ti и Cr. В процессе наплавки происходит активное образование карбидов, что приводит к обеднению углеродом образующегося мартенсита и, следовательно, к уменьшению его твердости. Наличие в наплавленном металле ферритизаторов – Cr и Al и низкого содержания углерода обуславливают наличие феррита, обладающего

низкой твердостью. Таким образом, наплавленный металл обладает ферритно-мартенситной структурой с включениями карбидов Ti и Cr, что объясняет низкие значения твердости полученных наплавов.

В четвертой главе описаны технологические основы плазменного оплавления металлизационных покрытий для повышения износостойкости рабочих органов почвообрабатывающих машин. Для подтверждения экспериментальных данных по износостойкости оплавленных плазмой металлизационных покрытий проведены сравнительные эксплуатационные испытания лемехов, упрочненных по предложенной технологии.

Лемех с нанесенным металлизационным покрытием оплавливали плазмой по разработанной технологии.

Испытания проводили на полях СПК имени Калинина Дебесского района, Удмуртской республики. Показатели условий испытаний определяли по ГОСТ 20915-2011, РД 10.4.1-8У. Обработывали среднесуглинистые почвы при глубине обработки 25 см. Влажность почвы за период испытаний варьировалась за период испытаний в диапазоне 15–30 %. Скорость движения агрегата составила в среднем 7–9 км/ч.

Сравнение производили с двумя базовыми технологиями изготовления лемехов: объемная закалка и ТВЧ наплавка износостойким сплавом Сормайт №1. Анализ результатов массового износа показал, что при обработке суглинистых почв износостойкость лемехов, упрочненных по разработанной технологии на 34 % выше чем у закаленных и на 12 % выше, чем у наплавленных Сормайтом лемехов.

Также установлено, что угол заточки лезвия лемеха с оплавленным плазмой покрытием сохранился после эксплуатационных испытаний, что говорит о присутствии эффекта самозатачивания.

Упрочненные по разработанной технологии лемеха РЗЗ П.702Б плуга четырёхкорпусного навесного ПЛН-4-35 эффективно используются на Сельскохозяйственном производственном кооперативе имени Калинина, Удмуртской республики.

Заключение

1. Наличие пор и слоистой структуры металлизационных покрытий приводит к снижению их абразивной износостойкости, а достаточно низкая адгезия покрытия в условиях эксплуатации может привести к отслоению. Показано, что для повышения износостойкости покрытий наиболее эффективно использование последующего плазменного оплавления. Однако, такая обработка металлизационных покрытий на основе железа сдерживается вследствие отсутствия технологических рекомендаций применительно к обработке материалов с низкой теплопроводностью и высокой температурой плавления.

2. Для определения параметров режима обработки разработана модель распространения тепла от плазменного источника нагрева в двухслойной

композиции «металлизационное покрытие – основа». Анализ результатов расчетов позволил достоверно оценить влияние пористости, состава и толщины покрытия на их теплофизические характеристики, а также, параметров режима плазменной обработки на коэффициент формы проплавления композиции. Необходимые параметры режима плазменной обработки определены по критерию максимального коэффициента формы проплавления подложки, при этом отклонение результатов расчетов по разработанной модели от экспериментальных данных не превышает 20 %.

3. Установлено, что оплавленное покрытие состоит из четырёх основных характерных зон, располагающихся от основного металла к поверхности оплавления. Зона, примыкающая к основной стали, толщиной 50–150 мкм, состоит из мелких равноосных зерен 8–9 балла, над ней располагается зона толщиной до 50–100 мкм более крупных равноосных зерен 6–7 балла пакетного мартенсита, содержащего выделения дисперсных карбидов. Указанные зоны переходят в основной слой толщиной 1500–2000 мкм вытянутых столбчатых зёрен (дендритов), длиной 300–500 мкм и шириной 30–60 мкм, состоящих из пакетного мартенсита, окруженного тонкой оболочкой карбидной эвтектики и верхней части переплавленного покрытия, толщиной до 500 мкм, состоящей из равноосных зёрен размером 20–50 мкм. Строение указанных зон объясняется особенностями теплоотвода от расплавленного покрытия в основу с большим коэффициентом теплопроводности.

4. Показано, что образование плотной структуры мелкодисперсного мартенсита с карбидным упрочнением и равномерное распределение легирующих элементов при оплавлении покрытия системы Fe-Cr-C-Ti-Al приводит к повышению его микротвердости в 1,5 раза в сравнении с металлизационным покрытием до оплавления, имеющим неоднородную структуру мартенсита. Пониженная микротвердость наплавленных слоев обуславливается образованием ячеистой ферритно-мартенситной структуры, образовавшейся за счет обеднения углеродом металлической матрицы, при образовании большого количества карбидных фаз.

5. Установлено, что износостойкость оплавленных плазмой покрытий Fe-Cr-C-Ti-Al в 2,5 раза выше, чем у металлизационных покрытий до оплавления и в 1,4 раза выше износостойкости слоя, выполненного аргонодуговой наплавкой из той же порошковой проволоки. Значительные потери массы образцов с металлизационным покрытием после испытаний связаны со смешанным механизмом износа, сочетающим царапание и отслоение участков покрытия с низкой когезионной прочностью при попадании абразивных частиц в пограничные слои и поры покрытия. Пониженная износостойкость наплавленного металла обуславливается образованием ферритно-мартенситной структуры, обладающей более низкой твердостью в сравнении с мартенситной структурой оплавленного покрытия.

6. Разработан технологический процесс упрочнения экономнолегированных металлизационных покрытий системы Fe-Cr-C-Ti-Al путем плазменного оплавления применительно к лемехам плуга.

7. Упрочненные по разработанной технологии лемеха плуга прошли успешные испытания в колхозе имени Калинина Удмуртской республики.

8. По результатам эксплуатационных испытаний установлено, что ресурс упрочненных по разработанной технологии лемехов при обработке суглинистых почв на 34 % выше в сравнении с серийным лемехом из стали 65Г после объемной закалки.

9. Установлено, что угол заточки лезвия лемеха с оплавленным плазмой металлizationным покрытием сохранился после эксплуатационных испытаний, что указывает на присутствие эффекта самозатачивания.

Основные результаты опубликованы в следующих работах:

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК:

1. Верхорубов, В.С. Исследование влияния технологических параметров дуговой металлизации на адгезионную прочность покрытий / Ю.С. Коробов, С.В. Невежин, В.С. Верхорубов, Г.А. Ример, А.М. Кашфуллин // Сварка и диагностика. 2015. № 1. С. 24–27 (0,25 п.л./0,05 п.л.).

2. Верхорубов, В.С. Модель плазменного нагрева композиции «металлизационного покрытия – основа» / Ю.С. Коробов, В.С. Верхорубов, С.В. Невежин, Ю.Д. Щицын, Д.С. Белинин // Известия Самарского научного центра РАН. 2014. Т. 16. № 4(3). С. 576–579 (0,25 п.л./0,06 п.л.).

3. Верхорубов, В.С. Стойкость наплавленных слоёв и напыленных покрытий со структурой метастабильного аустенита против абразивного и адгезионного изнашивания / Ю.С. Коробов, М.А. Филиппов, А.В. Макаров, В.С. Верхорубов, С.В. Невежин, А.М. Кашфуллин // Известия Самарского научного центра РАН. 2015. Т. 17. № 2. С. 224–230 (0,42 п.л./0,07 п.л.).

4. Верхорубов, В.С. Структура напыленных покрытий типа Fe-C-Cr-Ti-Al после плазменного оплавления / В.С. Верхорубов, Ю.С. Коробов, М.А. Филиппов, Ю.Д. Щицын, С.В. Невежин, С.Д. Неулыбин // Известия Самарского научного центра РАН. 2015. Т. 17. № 2. С. 217–223 (0,42 п.л./0,08 п.л.).

Другие публикации:

5. Верхорубов, В.С. Сравнительный анализ наплавленных и напыленных покрытий со структурой метастабильного аустенита / Ю.С. Коробов, М.А. Филиппов, В.С. Верхорубов, С.В. Невежин, В.И. Шумяков, Ю.В. Худорожкова, Г.А. Ример // Сварка и контроль. Пермь: ПНИПУ, 2013. С. 163–169 (0,30 п.л./0,05 п.л.).

6. Верхорубов, В.С. Износостойкие покрытия, полученные методами наплавки и дуговой металлизации / В.С. Верхорубов, Ю.С. Коробов, М.А. Филиппов, С.В. Невежин, Ю.В. Худорожкова // Инженерная мысль

машиностроение будущего. Екатеринбург: УрФУ, 2013. С. 156–160 (0,21 п.л./0,04 п.л.).

7. Верхорубов, В.С. Износостойкие покрытия со структурой метастабильного аустенита для деталей сельскохозяйственных машин / Ю.С. Коробов, В.С. Верхорубов, С.В. Невежин, Ю.В. Щербаков, А.М. Кашфуллин // Инженерная мысль машиностроение будущего. Екатеринбург: УрФУ, 2013. С. 161–166 (0,25 п.л./0,05 п.л.).

8. Верхорубов, В.С. Износостойкость покрытий и наплавленного металла с метастабильным аустенитом / Ю.С. Коробов, В.С. Верхорубов, М.А. Филиппов, С.В. Невежин, А.М. Кашфуллин // Сварка и диагностика. [электронный ресурс]. Екатеринбург: УрФУ, 2014. С. 57–62 (0,24 п.л./0,05 п.л.).

9. Верхорубов, В.С. Экономнолегированная порошковая проволока для повышения ресурса эксплуатации плунжеров гидропрессов методом дуговой металлизации / Г.А. Ример, В.С. Верхорубов, С.В. Невежин, Ю.С. Коробов, М.А. Филиппов // Сварка и диагностика. [электронный ресурс]. Екатеринбург: УрФУ, 2014. С. 105–111 (0,24 п.л./0,04 п.л.).

10. Верхорубов, В.С. Модель распределения температур в композиции «металлизационное покрытие – основа» под воздействием сжатой дуги / В.С. Верхорубов, С.В. Невежин, Ю.С. Коробов, Ю.Д. Щицын, С.Д. Неулыбин // Сварка и диагностика. [электронный ресурс]. Екатеринбург: УрФУ, 2015. С. 58–64 (0,28 п.л./0,06 п.л.).

11. Верхорубов, В.С. Модель распределения температур в композиции «металлизационное покрытие – основа» под воздействием сжатой дуги / В.С. Верхорубов, Ю.С. Коробов, С.В. Невежин, Ю.Д. Щицын, И.А. Гилев // Master's Journal. 2015, №1. С. 81–86 (0,24 п.л./0,05 п.л.).

12. Верхорубов, В.С. Структурные характеристики износостойких покрытий, полученных наплавкой и дуговой металлизацией / В.С. Верхорубов, С.В. Невежин, Ю.С. Коробов, А.В. Макаров, М.А. Филиппов // Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР. Екатеринбург, 2015. С. 264–268 (0,25 п.л./0,05 п.л.).