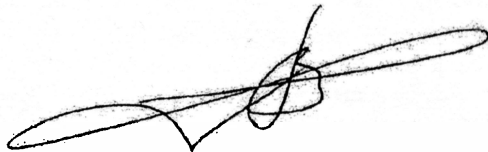


Иванайский Виктор Васильевич

**ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ СТРУКТУРОЙ, ФАЗОВЫМ СОСТАВОМ
И ИЗНОСОСТОЙКИМИ СВОЙСТВАМИ В ПОКРЫТИЯХ,
СФОРМИРОВАННЫХ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКОЙ
НА УГЛЕРОДИСТЫЕ И НИЗКОЛЕГИРОВАННЫЕ СТАЛИ**

Специальность 05.02.10 - Сварка, родственные процессы и технологии

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

A stylized handwritten signature in black ink, consisting of several loops and a long horizontal stroke at the end.

Москва - 2013

Работа выполнена в Алтайском государственном аграрном университете

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
ПЕРВУХИН Леонид Борисович
(Институт структурной макрокинетики и
проблем материаловедения РАН, в.н.с.)

доктор технических наук, профессор
ШАРАПОВ Михаил Григорьевич
(Центральный научно-исследовательский
институт конструкционных материалов
«Прометей», в.н.с.)

доктор технических наук
ПОЛОСКОВ Сергей Иосифович
(Научно-учебный центр «Сварка и контроль» при
МГТУ им.Н.Э.Баумана, нач. отдела сварки)

Ведущая организация – Всероссийский научно-исследовательский
технологический институт ремонта и
эксплуатации машинно-тракторного парка
(ГНУ ГОСНИТИ), г. Москва

Защита состоится « 27 » июня 2013 г. на заседании диссертационного
совета Д 212.141.01 при Московском государственном техническом
университете им. Н.Э.Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул.,
д.5.

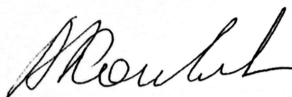
Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью
организации, просим высылать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ имени Н.Э. Баумана.

Телефон для справок: (495) 267-09-63.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., доцент



А.В. Коновалов

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Ежегодные потери металла в результате абразивного износа даже упрочненных деталей при обработке почвы и продуктов растениеводства составляют сотни тысяч тонн.

Для повышения ресурса различных деталей и узлов, работающих в условиях интенсивного абразивного износа, их изнашиваемые участки упрочняют наплавкой. Один из перспективных и недостаточно изученных способов упрочнения – это индукционная наплавка в сочетании с порошковыми материалами из высоколегированных хромистых белых чугунов и порошковыми материалами систем Fe-Cr-C и Fe-Cr-C-B. Исследованием этого процесса занимались Ткачев В.Н., Тененбаум М.М., Сидоров А.И. и др.

В процессе формирования износостойкого покрытия методом индукционной наплавки на упрочняемой поверхности углеродистых и низколегированных сталей образуется химическая и структурная неоднородность, при которой относительная износостойкость различных зон изменяется от 0,55 до 1,0 относительно друг друга.

Проведенный анализ условий эксплуатации рабочих органов сельхозмашин, упрочненных индукционной наплавкой, показал, что их преждевременный износ происходит из-за образования неоднородной структуры по сечению слоя. Эффективность производства и качество продукции неразрывно связаны с проблемой полного использования возможностей, которые заложены в упрочняемых материалах и технологиях их нанесения на конструкционные стали. В связи с этим актуально исследование влияния физических, химических и технологических приемов и их комплексного воздействия на строение, структуру, химический и фазовый состав в системе Fe-Cr-C при индукционной наплавке.

Фундаментальные исследования по созданию основ управления физико-химическими и технологическими свойствами износостойких покрытий на углеродистые и низколегированные стали проводились при финансовой поддержке РФФИ «проект № 11-08-980016-р_сибирь_a (Физико-химические основы создания эффективной эксплуатации износостойких покрытий на рабочих органах сельхозтехники).

Работа выполнялась в рамках создания новых эффективных участков по изготовлению наплавочной шихты для заводов «Целиноградсельмаш» (ЦСМ), г. Астана; «Октябрьской революции» (ЗОР), г. Одесса и «Алтайсельмаш» (АСМ), г. Рубцовск по теме 33/25/85 (Минсельхозмаш СССР), выполненной в НПО «АНИТИМ» с 1984 по 1985 гг., а также «Тематических госбюджетных работ по важнейшей тематике в НПО «АНИТИМ» в 1985-1986 гг.; хоз/договора 235/88 «Изготовление экспериментальной оснастки индукционной наплавки стрельчатых лап С 5.23 (частота 880 кГц)», 1988 г.; хоз/договора 289/89 «Наплавка опытной партии и проведение исследований упрочнения ножей землеройных машин индукционной наплавкой», 1989 г.

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



2029776

Иванайский В.В. Основы упр

Цель работы – разработка эффективных процессов управления структурой и фазовым составом в наплавляемых слоях из высоколегированных хромистых заэвтектических чугунов, сформированных индукционной наплавкой на углеродистые и низколегированные стали, и на этой основе создание составов шихты, технологий и конструкций деталей машин и механизмов с износостойкими покрытиями

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе необходимо было решить следующие задачи:

- 1) систематизировать факторы, влияющие на причину, образование неоднородной структуры в износостойких покрытиях из высоколегированных хромистых чугунов и смесей механических типа «ПС» на углеродистые и низколегированные стали;
- 2) исследовать тепловые процессы образования биметаллического соединения углеродистой стали с износостойким сплавом, экспериментально изучить влияние действия температуры на формирование структур в наплавленном слое;
- 3) создать методы регистрации и измерения температуры при нагреве токами высокой частоты на поверхности детали и шихты, а также способ определения температуры плавления многокомпонентных порошковых смесей;
- 4) изучить влияние физических, химических и технологических факторов на формирование однородной структуры в упрочняемом слое при образовании биметаллического соединения;
- 5) разработать, изготовить и испытать рабочие органы сельскохозяйственных машин для обработки почвы и переработки продуктов растениеводства;
- 6) обосновать практические рекомендации на основе проведенных комплексных теоретических и экспериментальных исследований по созданию новых технологических процессов упрочнения индукционной наплавкой рабочих органов сельхозмашин с обеспечением оптимальной конфигурации в течение всего периода эксплуатации.

Методы исследований. Методы и средства исследований базировались на фундаментальных положениях тепловых и контактных явлений с использованием математического и физического моделирования. В связи с этим разработана математическая модель тепловых процессов при нагреве многослойного материала с фазовым переходом в одном из слоев. Предложены разработанные автором новые методы определения температуры плавления шихты на поверхности детали и регистрации температуры поверхности при ее нагреве.

Для исследования металлургических процессов индукционной наплавки разработан метод определения температуры плавления многокомпонентной порошковой смеси.

Исследования структур выполнялись на металлографических микроскопах МИМ-7, Neophot-30, Carl Zeiss Axiobserver Z1m, микротвердость определяли на приборе ПМТ-3 при нагрузке 100 г, термический анализ проводили на приборе

NETZSCH STA 409PC/PG, состав покрытий устанавливался с помощью микро-рентгеноспектрального анализа (РЭМ) Philips SEM 515, микроанализатора EDAX ECON IV, фазовый состав определялся на дифрактометре ДРОН-6, износостойкость упрочненных образцов устанавливали при трении о не жестко закрепленные абразивные частицы (ГОСТ 23.208-79).

Научная новизна работы заключается в том, что:

- разработана методология электрофизических и химических воздействий, обеспечивающих управление структурой фазовым составом и механическими свойствами покрытий, полученных при упрочнении углеродистых и низколегированных сталей индукционной наплавкой в системе Fe-Cr-C;
- установлена возможность формирования структуры и механических свойств в высоколегированных хромистых заэвтектических чугунах, наплавленных индукционной наплавкой на углеродистые и низколегированные стали, путем влияния повышенной частоты электромагнитного поля, инокулирующих частиц, электрической дуги графитового электрода и создания подслоя для поверхностного легирования и борирования упрочняемой поверхности и наплавочной шихты;
- определена взаимосвязь между составом, структурой и износостойкостью покрытий из высоколегированных хромистых чугунов и смесей механических типа «ПС», сформированных индукционной наплавкой;
- разработаны новые методы и приемы регистрации и измерения температуры на фазовых границах в объеме биметаллических соединений, сформированных индукционной наплавкой;
- разработан способ определения температуры плавления многокомпонентных порошковых материалов.

Новизна технических решений подтверждена 14 авторскими свидетельствами и патентами РФ.

Практическая значимость работы:

1. На основе математического моделирования тепловых и физико-химических процессов, а также анализа экспериментальных исследований разработана система управления структурой и фазовым составом износостойкого слоя, наплавленного индукционным методом на углеродистые и низколегированные стали.
2. Разработаны способы регистрации температуры (а.с. № 1520996, № 1427716 и № 1403760) упрочняемой поверхности, температуры плавления шихты (а.с. № 1603268), что позволило контролировать удельную тепловую мощность, вводимую в упрочняемую поверхность детали.
3. Разработаны технологические процессы и оборудование, позволяющие одновременно осуществлять наплавку и закалку деталей (пат. № 2383109), поверхностное легирование упрочняемой детали (пат. № 2338625 и 2379109), созданы новые способы упрочнения рабочего органа (пат. № 2366139, 2397849), разработаны машина для испытания на абразивное изнашивание (пат. № 2325720) и имитационная масса (пат. № 2335752).

Для очистки поверхности детали от ржавчины, масел и других загрязнений при подготовке упрочняемой поверхности для создания боридного покрытия разработаны способ (пат. № 2361708) и шихта (пат. № 2361711).

На базе предложенных технических и технологических решений созданы и апробированы на предприятиях машиностроения, в фермерских хозяйствах упрочненные индукционной наплавкой и скоростным борированием стрелчатые лапы различных типов, долотообразные лемеха, молотки кормодробилок и другие рабочие органы.

Апробация работы. Основное содержание работы и ее отдельные положения доложены и обсуждены на международных и всероссийских конференциях:

- Региональной научно-практической конференции «Перспективы развития нанотехнологической сети региона» (Бийск, 26 марта 2009 г.);
- III Всероссийской научно-практической конференции «Аграрная наука в XXI веке» (Саратов, 21-23 марта 2009 г.);
- I Международной научно-практической конференции «Инновации в машиностроении» (Бийск, 9 октября 2010 г.);
- V Международной научно-практической конференции «Аграрная наука – сельскому хозяйству» (Барнаул, 24-26 апреля 2010 г.);
- VII Всероссийской научно-практической конференции в рамках выставки «Металлообработка. Урал – 2010», «Сварка. Специальные методы сварки» (Екатеринбург, 26-28 апреля 2010 г.);
- XI Международной научно-технической конференции «Измерение, контроль, информатизация» (Барнаул, 15-18 мая 2010 г.);
- IX Международной двусторонней Российско-Израильской конференции (Белокуриха, 25-30 июля, 2010 г.);
- XII Всероссийской научно-технической конференции «Новые химические технологии: производство и применение» (Пенза, август 2010 г.);
- VII Всероссийской научно-технической конференции «Защитные и специальные покрытия, обработка поверхности в машиностроении и приборостроении» (Пенза, октябрь 2010 г.);
- XVI Международной научно-практической конференции «Современная техника и технологии» (Томск, октябрь 2010 г.);
- V Международной научно-практической конференции «Современные проблемы машиностроения» (Томск, ноябрь 2010 г.);
- XXII Международной инновационно-ориентированной конференции «Будущее машиностроение России (ИМАШ РАН) (Москва, ноябрь 2010 г.);
- XII Международной научно-практической конференции «Новые материалы и технологии в машиностроении» (Брянск, ноябрь 2010 г.);
- Международной научно-практической конференции «Алдамжаровские чтения – 2011» (Костанай, декабрь, 2011 г.);
- VI Международной научно-практической конференции «Аграрная наука – сельскому хозяйству» (Барнаул, 3-4 февраля 2011 г.);

- III Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы сельского хозяйства горных территорий» (Горно-Алтайск, 1-4 июня 2011 г.);
- V Всероссийской научно-практической конференции «Исследования и достижения в области теоретической и практической прикладной химии (Барнаул, 26-28 октября 2011 г.).

Участие в выставках: VIII Международной машиностроительной выставке «MASHEX-2010»; ВК «КРОКУС-ЭКСПО», октябрь 2010 г. (г. Москва); «Образование наноструктурированных боридных покрытий на сталях при ТВЧ-нагреве» (диплом выставки); XVI агропромышленная выставка Сибири «Алтайская Нива – 2010»; КДС, октябрь 2010 г. (г. Барнаул); III выставка-ярмарка изобретений (Алтайский край, 27-28 апреля, 2011 г.).

Выступления с докладами на научных семинарах кафедры: «Сварочное производство и диагностика» МГТУ им Н.Э. Баумана (г. Москва, 2011 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 70 научных работ, в том числе три монографии, 21 статья в ведущих рецензируемых научных журналах по перечню ВАК РФ. Получено 14 авторских свидетельств и патентов РФ

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, семи глав, выводов, списка литературы из 273 наименований. Работа изложена на 305 страницах текста, содержит 133 рисунка, 28 таблиц.

Во введении раскрыта актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследований, приведено обоснование научной новизны и практической значимости работы, представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрено современное состояние вопроса, направленное на изучение закономерностей образования упрочняющих слоев наплавленного металла при индукционной наплавке с обеспечением протекания металлургических процессов с максимальной вероятностью образования однородной структуры в наплавленном слое при кристаллизации высоколегированных хромистых чугунов. Приведены конструкции полуавтоматических установок, узлы и оригинальные механизмы, внедренные на заводах сельскохозяйственного машиностроения при участии автора.

Во второй главе проведены исследования тепловых и физико-химических процессов, протекающих при индукционном методе упрочнения поверхности деталей из углеродистых низколегированных сталей.

Для теоретических исследований процесса индукционной наплавки высоколегированных хромистых белых чугунов на конструкционные стали разработаны физический образ, физическая и математическая модели при ТВЧ-нагреве многослойного материала с учетом фазового перехода (плавлением) в одном из слоев.

Наплавочная пшхта 1 (рис. 1) наносится на прямоугольную пластину 2 в месте ее максимального износа с края одного торца детали длиной h ($l \geq h$). Пластина помещается в высокочастотное электромагнитное поле индуктора, после включения которого на внешних границах упрочняемой поверхности с окружающей средой в скин-слоях 3 с толщиной δ за счет взаимодействия вих-

ревых токов с материалом начинает выделяться тепловая энергия, которая нагревает пластину с шихтой до T_l и расплавляет наплавочную шихту.

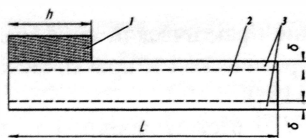


Рисунок 1. Схема многослойного материала:

1 – расплавляемый слой;

2 – слой основного упрочняемого материала; 3 – скин-слой

Допускаем, что: слой 1 прозрачен для электромагнитного поля, поэтому расплавление слоя осуществляется от тепла нагреваемой пластины 2; конкретные числовые значения температур и других параметров в слоях распределены в интервалах $T_i - T_j$, $x_i - x_j$, как непрерывные случайные величины.

Выберем систему координат и введем обозначения (рис. 2).

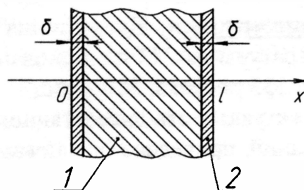


Рисунок 2. К решению задачи на первом этапе

В этом случае изменение температуры слоя 1 может быть определено по формулам (1-3):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_1^2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + f(x); \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_1 [T_1(0, t) - T_c]; \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=l} = -\alpha_1 [T_1(l, t) - T_c]; \quad (3)$$

где T_l – температура пластины, К; $a_1^2 = \frac{\lambda}{c_1 \rho_1}$ – коэффициент теплопередачи, $\text{м}^2/\text{с}$;

λ, c_1, ρ_1 – коэффициенты, теплопроводности (Вт/(м К)); удельной теплоемкости (Дж/кг К) и плотности ($\text{кг}/\text{м}^3$) основного материала, соответственно; T_c – температура окружающей среды.

Температура расплава и шихты может быть определена по известным формулам (4, 6) на втором этапе:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_2^2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad - \text{расплав} \quad (0 < x < \xi(t)); \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_3^2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad - \text{расплав} \quad (\xi(t) < x < \infty), \quad (5)$$

в которых к условиям, обозначенным выше, добавится условие теплового баланса на границе раздела фаз: $\lambda_2 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\xi(t)} - \lambda_3 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\xi(t)} = \mu \rho \frac{d\xi}{dt}$; (6)

где $T_2(x, t)$ – температура расплава, К; $T_3(x, t)$ – температура шихты, К; α_2^2, α_3^2 – коэффициенты теплопередачи расплава и шлака, соответственно ($\text{м}^2/\text{с}$); λ_2, λ_3 – теплопроводности расплава и шлака соответственно ($\text{Вт}/(\text{м}^2\text{К})$); T_0 – температура пластины (получается из решения задачи первого этапа), К; T_c – начальная температура шихты, К; T_p – температура плавления шихты, К; $\xi(t)$ – закон перемещения границы расплава; μ – скрытая теплота плавления шихты ($\text{Дж}/\text{кг}$).

Тогда решением задачи на втором этапе будет:

$$T_3(x, t) = \frac{T_c \Phi\left(\frac{\alpha}{2\alpha_3}\right) - T_p}{\Phi\left(\frac{\alpha}{2\alpha_3}\right) - 1} + \frac{T_p - T_c}{\Phi\left(\frac{\alpha}{2\alpha_3}\right) - 1} \Phi\left(\frac{x}{2\alpha_3\sqrt{t}}\right) \quad (7)$$

$$T_2(x, t) = T_0 + \frac{T_p - T_0}{\Phi\left(\frac{\alpha}{2\alpha_2}\right)} \Phi\left(\frac{x}{2\alpha_2\sqrt{t}}\right); \quad (8)$$

Расчет по уравнениям (7, 8) позволяет моделировать процесс ТВЧ - нагрева многослойного материала, например, для рассмотренного случая индукционной наплавки. Так как функции тепловых источников $f(x)$ и $\Phi(x)$ заданы таблично, то исследуем поведение полученной математической модели численными методами.

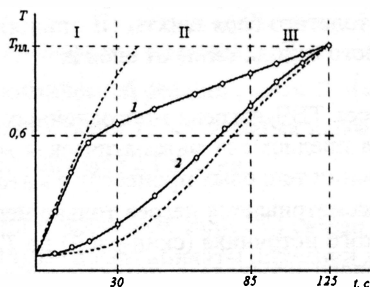


Рисунок 3. Расчетное (---) и экспериментальное (—) изменение температуры во времени на границе металл-шихта 1 и границе шихта-воздух 2 в процессе получения биметаллического соединения «65Г-ПГ-С27» при стационарном ТВЧ-нагреве

На рисунке 3 приведены результаты расчетов температуры на границах слоев 2-1 и 1 – окружающая среда для стационарного процесса ТВЧ-нагрева заготовки $17 \times 100 \times 5$ мм из стали 65Г, покрытой слоем наплавочной шихты толщиной 5 мм, состоящей из 85 мас. % твердого сплава ПГ-С27 и плавленого боратного флюса для индукционной наплавки П-0,66 на частоте 66 кГц ($Q_0 = 0,5-1,0$ кВт), выполненные на ПК в среде MathCad v. 11.0 по уравнениям (6, 7 и 8), а также экспериментальные результаты измерения температуры

на указанных границах многослойного материала, выполненные хромель-алюмелевой термопарой.

Как следует из рисунка 3, в исследованной системе экспериментально наблюдается как минимум две временных стадии для основного металла, отличающиеся интенсивностью нагрева, и три стадии – для нагрева шихты.

На стадии I (0-30 с) на границе основной металл-шихта происходит интенсивный рост температуры до $0,6T_{пл.}$, которая для сплава ПГ-С27 достигает 920-970 К, а на границе шихта-воздух лишь 370-420 К. По времени эта стадия занимает порядка 25-30% от общего времени нагрева.

II стадия процесса (30-85 с) характеризуется снижением интенсивности нагрева основного металла в 3-4 раза, но при этом увеличивается скорость нагрева наплавочной шихты. Продолжительность стадии составляет 40-50% общего времени ТВЧ-нагрева.

На стадии III (85-125 с) интенсивность нагрева несколько понижается. На контактирующих поверхностях между зёрнами твёрдого сплава и основного металла образуется легкоплавкая эвтектика, имеющая для системы ПГ-С27 флюс П-0,66 температуру плавления ~ 1370 К.

Данная модель удовлетворительно предсказывает все три стадии плавления шихты, при этом ошибка расчета температуры (занижение) не превышает 11-15%. Нагрев поверхности основного металла хорошо описывается моделью лишь на первой стадии, в интервале температур $T_c - 0,6T_{пл.}$, здесь ошибка (завышение) расчета температуры составляет 10-15%. Расхождение расчетных и экспериментальных точек при $T > 0,6T_{пл.}$, возможно, связано с началом усиленного плавления толстого слоя шихты (II стадия) и при этом неучтенного в модели дополнительного отвода тепла от слоя 2.

Таким образом:

- для описания процесса ТВЧ-нагрева многослойных материалов при плавлении одного из слоев предложена математическая модель, основанная на 2-стадийном рассмотрении тепловых процессов в материале;
- на первой стадии рассматривается нагрев только неплавящегося слоя сверху и снизу полем плоского источника (скин-слой) до $T_{пл.}$ шихты, на второй стадии – процесс фазового перехода в плавящемся слое и движение фронта расплава к границе окружающей среды;
- с помощью предложенной модели численным методом исследовано изменение температуры во времени на границах слоев в процессе получения биметаллического соединения «65Г-ПГ-С27» в стационарном режиме. Модель показала адекватные эксперименту результаты, расхождение расчетных значений температуры с экспериментальными составило 10-15%.

В основу разработанной математической модели химических процессов при индукционной наплавке положены уравнения, предложенные В.Н. Бороненковым, С.М. Шанчуровым и др., для электрошлаковой и дуговой сварки и наплавки.

Блок-схема взаимодействия фаз при индукционной наплавке приведена на рисунке 4.

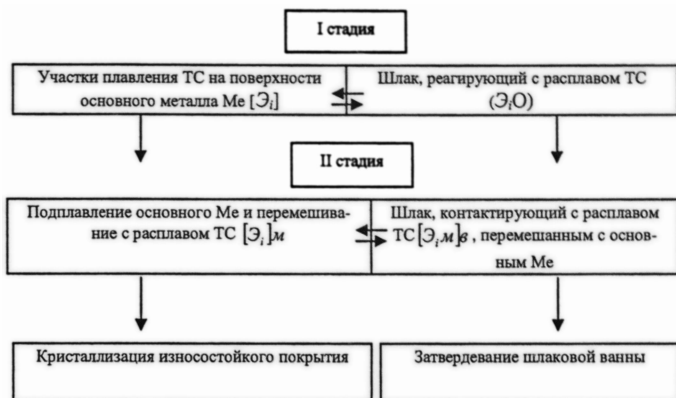


Рисунок 4. Блок-схема взаимодействия фаз при индукционной наплавке;
ТС – твердый сплав

Выражение для расчета концентрации i -го элемента на стадии 1 (рис. 4) плавления твердого сплава на поверхности основного металла:

$$[\varepsilon_i]_j = [\varepsilon_i]_{j-1} - \frac{J_j S_j M \cdot 100}{v_{mj}}, \quad (9)$$

где $[\varepsilon_i]$ – содержание i -го элемента в металле, %; J_j – скорость ухода элемента в шлак на стадии j , т.е. химической реакции, моль $\varepsilon_i / (m^2 \cdot c)$; S_i – площадь реакционной поверхности на стадии 1; M – атомная масса элемента; v_{mj} – скорость плавления твердого сплава на I стадии.

Состав металлической и шлаковой ванн (%) связан с составами шва и шлаковой корки через известные коэффициенты ликвации x и $x_{ок}$:

$$\frac{[\varepsilon_i]_{ш}}{[\varepsilon_i]_4} = x; \frac{(\varepsilon_i n O_m)_к}{(\varepsilon_i n O_m)} = x_{ок} \quad (10)$$

где x и $x_{ок}$ – коэффициенты ликвации; $(\varepsilon_i n O_m)$ – массовое содержание данного оксида в шлаке, %.

Расчет состава наплавленного слоя проводится последовательно: вначале для первого промежутка времени, когда составы фаз известны, по уравнению (9) находим составы металла после взаимодействия на I стадии, а затем на II стадии к моменту времени $(k+1) \Delta t$.

Результаты расчета, выполненные с помощью разработанной математической модели химических процессов, сравнили с опытными данными (табл. 1).

Таким образом, математическая модель физико-химических процессов, протекающих при индукционной наплавке, позволяет прогнозировать химический состав наплавленного слоя.

Таблица 1.

Содержание химических элементов в шихте и наплавленном покрытии

№ п/п	Марка сплава	Химический состав элементов, %									
		в шихте					в наплавленном слое*				
		C	Si	Mn	Cr	P	C	Si	Mn	Cr	P
1	ПГ-С 27	3,8	1,9	1,3	25,7	-	<u>3,1</u> 3,5	<u>1,5</u> 1,9	<u>0,9</u> 1,2	<u>24,7</u> 26,1	-
2	ПГ-УС 25	4,1	2,5	1,8	35,7	-	<u>3,5</u> 3,8	<u>2,1</u> 2,4	<u>1,5</u> 1,7	<u>34,2</u> 35,1	-
3	ПС-14-60	5,3	2,5	1,0	36,1	0,25	<u>4,5</u> 5,0	<u>2,1</u> 2,6	<u>0,8</u> 1,2	<u>34,2</u> 35,7	

* В числителе – данные, полученные расчетным методом, в знаменателе – опытные данные.

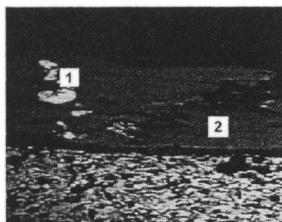


Рисунок 5. Закристаллизовавшиеся частицы расплава (1) в шлаке (2)

В третьей главе разработаны: способ и состав (А.С. 1427164 А.С. 1520996) для регистрации температуры начала плавления твердого сплава на упрочняемой поверхности детали.

Регистрацию температуры воспламенения состава термоиндикатора реализовывали следующим образом. После калибровки термопары ее подключали к АЦП K57 ПВ1А и осуществляли передачу и считывание ее с ЭВМ. Для серии параллельных измерений температуры использовали три состава, которые нагревали на пластине при помощи газовой горелки (рис. 6)



Рисунок 6. Воспламенение термоиндикатора при помощи газовой горелки

Общая погрешность измерения температуры при этом аппаратном оформлении с использованием программно-аппаратного комплекса не превысила 10%.

На рисунке. 6 показана таблетка термоиндикатора, полученная из порошка алюминия АСД-1 и титана, а в качестве связующего - 1%-ный раствор канифоли в спирте. Аналогично готовили и таблетки, содержащие в своем составе другие терморреагирующие компоненты (алюминий, оксид хрома, углерод) - Пат. РФ № 7427808.

Для контроля температуры воспламенения подготовленных таким образом образцов использовали вольфрам-рениевую термопару диаметром 0,2 мм, которую с помощью конденсаторной сварки приваривали к пластине из стали 10Х18Н9Т размером 40х60х5 мм, а в непосредственной близости от термопары устанавливали образец таблетки-термоиндикатора (рис. 7).

На рисунке 7 показан процесс воспламенения термоиндикаторов непосредственно в индукторе на поверхности стрелчатой лапы.



Рисунок 7. Воспламенение термоиндикатора на поверхности детали, нагреваемой токами высокой частоты

На температурной кривой виден характерный температурный всплеск при воспламенении термоиндикаторной порошковой смеси (рис. 8).

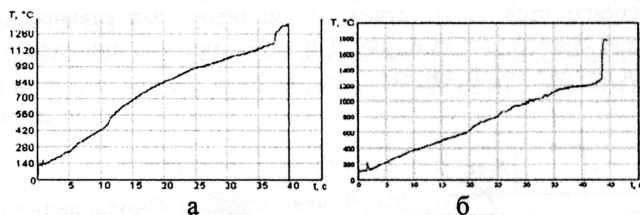


Рисунок 8. Характерные температурные графики нагрева и воспламенения термоиндикаторов при толщине таблеток 1 мм (а) и 2 мм (б)

Разработан способ определения температуры плавления порошковой смеси, что позволяет исследовать и корректировать удельную мощность тепловыделения при индукционном упрочнении поверхности детали.

Для определения температуры плавления наплавочной шихты хромель-алюмелевую термопару диаметром 0,2 мм, изолированную двухканальной керамикой от места горячего спая до соединения с компенсационными проводами, приваривали к зерну (0,8-1,0 мм) высоколегированного хромистого чугуна и помещали в наплавляемую шихту, насыпанную ровным слоем толщиной 3 мм на сталь 65Г. При этом каждый горячий спай термопары через компенсационные провода присоединяли к высокочувствительному усилителю и плате сбора

информации ЭВМ. Подготовленный образец с шихтой помещали в щелевой индуктор и проводили нагрев таким образом, чтобы наибольшее количество теплоты выделялось на некотором расстоянии (40-80 мм) от термопары. В процессе наплавки записывали показания в координатах: время (мс) и эдс (мВ) - А.с. 1603268 (рис. 9).

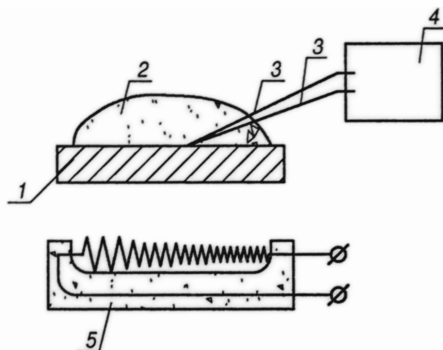


Рисунок 9. Схема определения температуры плавления наплавочной шихты:
1 – упрочняемый металл; 2 – наплавочная шихта; 3 – термопара; 4 – компьютер;
5 – источник нагрева металла и плавления шихты

Регистрация температуры плавления наплавочной шихты осуществляется следующим образом: по мере приближения фронта плавления к термопаре происходит постепенное повышение температуры, затем наблюдается интенсивное увеличение скорости нагрева при достижении фронтом плавления участка, на котором располагается термодатчик. На мониторе это отмечается перегибом температурной кривой (точка К, рис. 10), по которому и определяли температуру плавления наплавочной шихты.

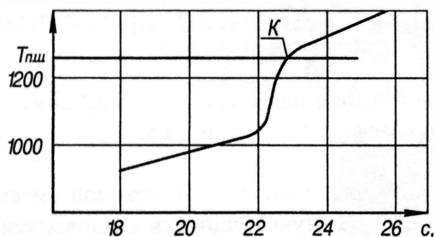


Рисунок 10. Определение температуры плавления наплавочной шихты при индукционной наплавке

Этим методом оценивали температуру плавления сплавов ПГ-С27 и ПГ-УС25 одной партии, но из разных банок (по 30 кг) – у ПГ-С27 разность температур достигла 323-343 К, а у ПГ-УС25 она составляла 333-343 К.

Важной составляющей процесса упрочнения индукционным методом является характер нагрева частицы в наплавочной шихте. Поэтому оптимизация их

нагрева на упрочняемой детали невозможна без регистрации с достаточной степенью точности (± 283 K) температурных режимов наплавки.

Для измерения температуры порошковых материалов, в том числе и твердого сплава для индукционной наплавки, рабочий спай термопары приваривали к отдельной частице порошка, в которой измеряли температуру. Последовательность операций при изготовлении этого устройства состоит из нескольких этапов (рис. 11). Выбирается частица высоколегированного хромистого чугуна размером не менее трех диаметров электрода 1 термопары, а частица 2 устанавливается в разделочную кромку приспособления 3, к частице прижимаются электроды. Затем конденсаторной сваркой к электродам приваривается частица твердого сплава.

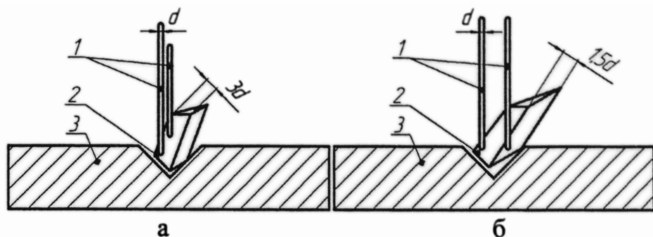


Рисунок 11. Схема приварки двух электродов к одной (а) и двум (б) плоскостям частиц: 1 – термоэлектрод; 2 – частица высоколегированного хромистого чугуна; 3 – приспособление для приварки частиц

На рисунке 11 показана схема крепления термоэлектродов к одной (рис. 12а) и по двум плоскостям (рис. 12б).

Предлагаемый способ обеспечил измерение температуры нагрева зерен упрочняемого сплава с учетом требований, предъявляемых к контактным датчиком температуры.

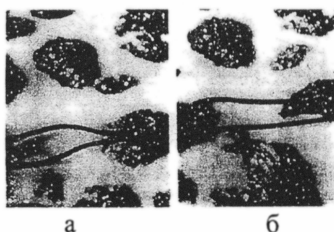


Рисунок 12. Схема крепления термоэлектродов к одной (а) и двум (б) плоскостям (x20)

Этим методом измеряли температуру нагрева зерен наплавляемого сплава на границах шихта – основной металл и шихта – воздух. Полученные результаты достаточно достоверны, так как форма и химический состав рабочего слоя не отличаются от формы и химического состава отдельных частиц нагреваемого порошкового материала.

В данной главе также приведены и стандартные методики измерения структуры фазового состава и химического анализа наплавленных износостойких покрытий из высоколегированных хромистых белых чугунов и смесей механических типа «ПС».

В четвертой главе на основании полученных теоретических и экспериментальных результатов при исследовании температурных полей на упрочняемых поверхностях деталей в зависимости от их профиля поперечного сечения проводились исследования по возможности управления структурой наплавленного высоколегированного хромистого белого чугуна на конструкционные и низколегированные стали при электрофизическом воздействии.

На рисунке. 13а и 13б показаны структуры наплавленного твердого сплава (ПГ-С27 и ПС-14-60) на частоте 880 кГц. Видно, что по линии соединения образуются только отдельные дендритные включения, что не оказывает существенного влияния на износостойкость.

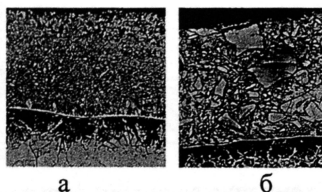


Рисунок 13. Микроструктура образцов сплавов ПГ-С27 (а), ПС-14-60 (б), наплавленных на частоте 880 кГц (x100)

Исследовалась возможность переплавления наплавленных участков графитовым электродом на обратной полярности. На рисунке приведены микроструктуры до воздействия (рис. 14а) и после (рис. 14б).

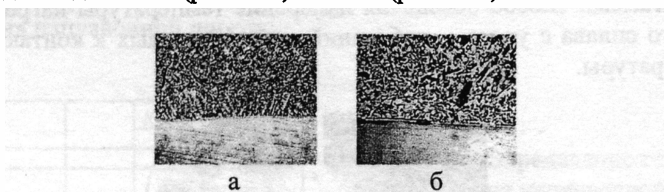


Рисунок 14. Структура наплавленного слоя (x150) до (а) и после (б) его переплавления электрической дугой графитового электрода

Выполнялись исследования по подавлению образования доэвтектической зоны в наплавляемом высоколегированном хромистом чугуне посредством легирования спеченным сплавом ВК-5.

На рис. 15 показаны микроструктуры с поверхностным легированием (рис. 15а) и без поверхностного легирования (рис. 15б). Видно, что в зависимости от глубины легирования упрочняемой поверхности степень перегрева наплавляемого расплава может достигать 40%.

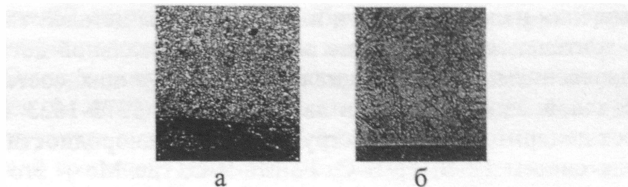


Рисунок 15. Микроструктура наплавленного слоя (x150).
Электроискровое упрочнение + индукционная наплавка (а);
без электроискрового упрочнения при перегреве до 40% (б)

В пятой главе проводились исследования по управлению структурой и фазовым составом в процессе упрочнения поверхности деталей и заготовок, выполненных из углеродистых и низколегированных сталей с использованием различных составов шихты, их скоростного борирования и твердого сплава в процессе ТВЧ-нагрева.

Установлено, что флюсы в составе шихты от заводов АСМ, ЗОР и ЦСМ оказывают влияние на формирование характерных зон в наплавленном сплаве (рис. 16).

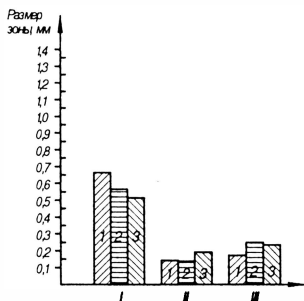


Рисунок 16. Влияние различных флюсов на величину характерных зон в наплавленном слое:
1 – флюс завода АСМ; 2 – флюс завода ЦСМ;
3 – флюс завода ЗОР;
I – завтектическая зона,
II – дозвтектическая зона,
III – эвтектическая зона

Максимальный размер завтектической зоны в расплавленном слое наблюдается при наплавке шихты с флюсом завода АСМ, а минимальный размер – с флюсом завода ЗОР (рис. 17).

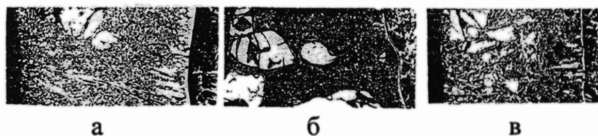


Рисунок 17. Структуры наплавленного слоя с флюсами:
а – АСМ; б – ЦСМ; в – ЗОР

Микротвердость по высоте наплавленного слоя более равномерно распределяется при наплавке флюсом завода АСМ (рис. 18).

Для повышения износостойкости и срока службы деталей также осуществляли предварительное борирование поверхности стальной детали при ТВЧ-нагреве с нанесением на нее специальных борлирующих составов, которые образуют подслои из новых фаз и эвтектики при 1373-1623 К, предотвращающий рост дендритов и другие структурные неоднородности в наплавленном слое для систем Fe-B, Fe-B-C, Fe-Me-B-C, где Me – это легирующий элемент из группы Cr, Mn, Ni и т.п. (табл. 2).

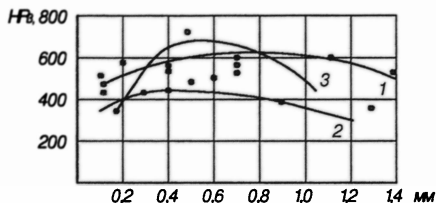


Рисунок 18. Влияние различных флюсов на изменение микротвердости по толщине наплавленного слоя: 1 – флюс завода АСМ; 2 – флюс завода ЦСМ; 3 – флюс завода ЗОР

Рентгенофазовый анализ покрытий показал присутствие в них фаз: α -Fe, FeB и Fe_2B , $\text{Fe}_3(\text{C},\text{B})$, $\text{Fe}_{23}(\text{C},\text{B})_6$, мета- и ортоборатов железа (Fe_3BO_3 , Fe_3BO_6 , Fe_3BO_5), вюстит FeO и шпинели $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, то есть при нагреве токами высокой частоты низколегированных и углеродистых сталей под слоем флюса П-0,66, содержащего от 84 до 90% борлирующих компонентов на поверхности стали, образуется подслой из сложных боридных покрытий. Для выяснения характеристик и структуры полученного подслоя были изучены микрофотографии шлифов (рис. 19а-в).

Таблица 2.

Состав исследованных борлирующих смесей, мас. %

Смесь	Борлирующий компонент	Активатор	Флюс
I	B_4C (90)	-	П-0,66 (10)
Ia	B_4C (84)	NH_4Cl (6)	П-0,66 (10)
II	B_4C (84)	-	П-0,66 (16)
IIa	B_4C (90)	CaF_2 (5)	П-0,66 (5)
III	B (90)	-	П-0,66 (10)
IIIa	B (90)	CaF_2 (5)	П-0,66 (5)

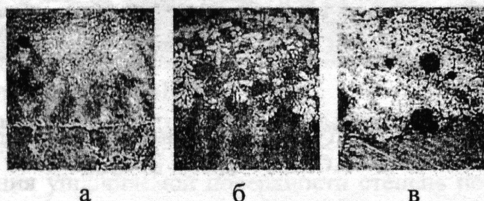


Рисунок 19. Структура боридного подслоя на стали 65Г, полученного за 1 мин. из различных смесей (х250): а – Ia; б – II; в – IIIa

Из рисунка 19 следует, что при выбранной температуре и времени борирования структура и состояние границы полученных износостойких подслоев отличаются. Однако, в отличие от классических боридных иглообразных двухфазных слоев, на поверхности заготовок формируется более стойкая предпочтительная структура в виде боридной эвтектики в форме пластин с выраженной диффузионной границей. Изменений структуры основного металла из-за перегрева не наблюдается. Образуются боридные покрытия трех типов.

В таблице 3 приведены результаты микрорентгеноспектрального анализа боридного подслоя на сталях 65Г и 50ХГА, откуда следует, что в состав основной матричной и упрочняющих фаз всех исследованных покрытий помимо железа и бора входит углерод, причем его доля колеблется от 13,4 до 28 масс.%, что отвечает фазам, содержащим углерод: от цементита и карбоборидов Fe до специальных карбидов и карбоборидов Fe, Mn и Cr. При нагреве упрочняемой поверхности токами высокой частоты, осуществлении процесса скоростного борирования возникают условия для образования метастабильных фаз переменного состава бора и углерода в железе. В пользу этого свидетельствуют и данные рентгенофазового анализа (идентификация по картотеке JCPDS), объективно подтверждающие существование во всех полученных покрытиях только фазы FeB_2 и ее кристаллохимического димера Fe_2B_4 (рис. 20).

Таблица 3.

Результаты микрорентгеноспектрального анализа
основных фаз в боридном подслое на стали 65Г и 50ХГА

Обозначение фазы, элементы	Описание фазы, морфология	Состав, элемент, %		Химическая формула
		весовой	атомный	
■ - Fe, C, B	матрица – серое поле в ледебуритоподобной эвтектике	Fe – 57,25 C – 28,02 B – 14,73	21,72 49,42 28,86	$\text{FeC}_{2,3}\text{B}_{1,3}$
■* - Fe, C, B	то же	Fe – 64,31 C – 22,30 B – 13,38	27,12 43,73 29,15	$\text{FeC}_{1,6}\text{B}_{1,1}$
▲ - Fe, C, B	упрочняющая фаза – светлые области эвтектики	Fe – 50,63 C – 23,11 B – 26,25	17,24 36,59 46,17	$\text{FeC}_{2,1}\text{B}_{2,7}$
◆ - Fe, Mn(Cr), C, B	упрочняющая фаза – пластинчатые кристаллы или иглы	Fe – 64,70 Mn(Cr) – 1,21(1,35) C – 23,01 B – 11,08	28,11 0,54(0,62) 46,49 24,87	$\text{Fe}_{58}\text{MnC}_{96}\text{B}_{51}$ $\text{Fe}_{58}\text{CrC}_{96}\text{B}_{51}$
◆* - Fe, C	упрочняющая фаза – темные замкнутые области	Fe – 86,60 C – 13,40	58,15 41,85	$\text{Fe}_{1,4}\text{C}$

* Данные для аналогичной фазы в покрытии на стали 50ХГА.

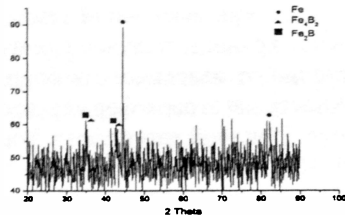


Рисунок 20. Рентгенограмма покрытия, полученного на стали 65Г за 1,5 мин.

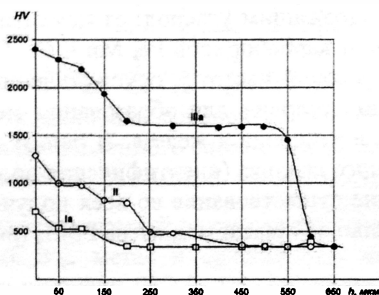


Рисунок 21. Распределение микротвердости по глубине покрытий, полученных из различных боридующих смесей за 1 минуту

Исследование распределения микротвердости полученных подслоев по глубине показало наличие в них, как правило, двух зон – более твердого поверхностного слоя и менее твердого слоя, лежащего под ним, протяженность и характеристики которых различаются (рис. 21).

При ТВЧ-нагреве этих же образцов в течение 1,5 мин., имеют иную структуру (рис. 22а, б, в).

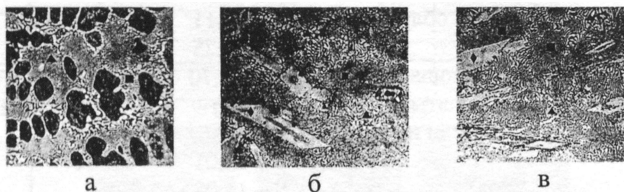


Рисунок 22. Структура боридного подслоя на стали 65Г, полученного за 1,5 мин. из различных смесей (х400): а – I, б – Па, в – Ша

Как следует из рисунка. 22, при таких условиях борирования в подслое образуются структуры двух типов. Так, в покрытии, полученном при ТВЧ-нагреве из смеси, содержащей карбид бора и флюс П-0,66 без активаторов, наблюдается разрастание ледебуритоподобной железо-боридной эвтектики, которая имела

мелкозернистую структуру на образцах, выдержанных при температуре 1470-1570 К в течение 1 мин., причем состав эвтектики изменяется в более светлых и темных участках. В эвтектической матрице наблюдаются равномерно распределенные замкнутые карбидные области (рис. 22а). Микротвердость образующегося покрытия – 1450-1600 НВ, толщина – до 300-350 мкм.

Введение в состав борирующей смеси активатора CaF_2 и (или) замена карбида бора более активным $\text{B}_{\text{аморфн}}$ приводит к появлению в железо-боридной матрице новых фаз – пластинчатых кристаллов смешанных карбоборидов Mn и Fe (рис. 22б, в). Микротвердость таких покрытий на стали 65Г достигает максимальных значений – 2250-2350 НВ, а толщина – 600-800 мкм. Покрытия обоих типов имеют сглаженную границу с основным металлом, вызванную его частичным подплавлением вследствие усиленного прогрева токами высокой частоты и теплом происходящих при борировании химических реакций.

Вовлечение в состав боридного подслоя углерода основного металла и легирующих элементов положительно сказывается и на формировании однородной структуры наплавленного слоя, чем при наплавке заэвтектических хромистых чугунов непосредственно на упрочняемый материал.

На рисунке 23 показаны типичные структуры упрочняющих покрытий, полученных индукционной наплавкой на предварительно защищенную боридным подслоем поверхность (толщиной 0,1-0,15мм) образцов при ТВЧ-нагреве стали 65Г под борирующей обмазкой на основе B_4C и флюса П-0,66 для сплавов марок ПГ-УС25 и ПС-14-60 на стали 50ХГА. Основой (матрицей) износостойкого покрытия в обоих случаях, как и ранее, является железо-боридная эвтектика, однако для этих сталей при таком оформлении процесса величина зоны структурной неоднородности незначительна, а дендриты – практически не образуются.

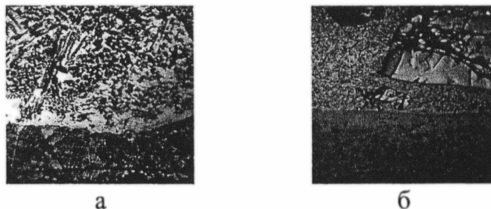


Рисунок 23. Структура износостойкого покрытия на боридном подслое, полученном за 2 мин. для материала:

а – ПГ-УС25 на стали 65Г, б – ПС-14-60 на стали 50 (х400)

Таким образом, хотя наиболее эффективной в процессе подготовки подслоя для индукционной наплавки высокоскоростным борированием при ТВЧ-нагреве и оказалась обмазка на основе состава IIIа, содержащая аморфный бор, который в присутствии флюса П-0,66 и активатора CaF_2 образует с основным металлом самые протяженные и твердые покрытия, однако из-за наличия выраженной границы раздела с основным металлом, наличия в покрытии остатков флюса и высокой стоимости аморфного бора для получения подслоя для износостойких покрытий при ТВЧ-нагреве следует рекомендовать обмазки

на основе составов с карбидом бора и флюса П-0,66 и проведение процесса борирования в течение 1-1,5 мин., что подтверждают проведенные исследования. При этом основной металл в твердой фазе насыщается различными неметаллами или легирующими элементами при химико-термической обработке, на поверхности детали образуются износостойкий подслои и слои различных бинарных или более сложных соединений железа.

Полученные выше результаты стали основой для проведения исследования одновременного борирования жидкой фазы твердого сплава и упрочняемой поверхности стали 65Г, которые проводились посредством индукционного нагрева и плавления специальной наплавочной шихты, где часть флюса в пределах 6-8% была заменена карбидом бора.

После охлаждения из образцов вырезались темплеты и готовились шлифы для определения микроструктуры, ширины зоны борирования и микротвердости.

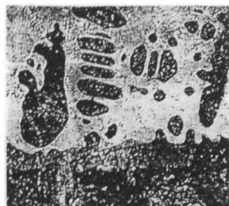


Рисунок 24. Зона сплавления
борированного твердого сплава (ПГ-С27)
и стали 65Г (х300)

На рисунке 24 показана микроструктура зоны сплавления борированного твердого сплава и упрочняемой поверхности.

Расплавленный упрочненный сплав насыщается бором и углеродом, и после кристаллизации образуется мелкодисперсная заэвтектическая структура микротвердостью 800-1200 HV (рис. 25).

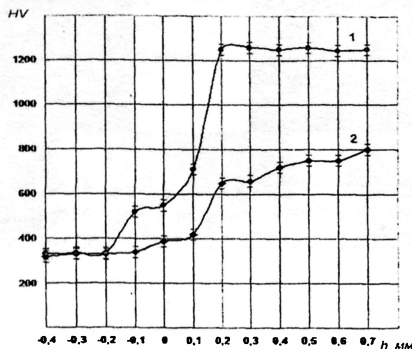
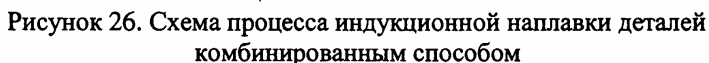


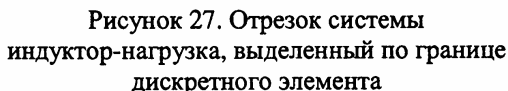
Рисунок 25. Микротвердость зоны сплавления твердого сплава (кривая 1)
и основного металла (кривая 2)

Микротвердость наплавленного твердого сплава ПГ-С27 с добавлением карбида бора по толщине покрытия остается неизменной, а структура – дисперсной. Она состоит из мелкодисперсной эвтектической структуры с

В шестой главе разработана математическая модель индукционной наплавки деталей переменного сечения и упрочнения рабочих органов с учетом конструктивно оптимального расположения упрочняющих покрытий, позволяющая создавать повышенную износостойкость в процессе обработки почвы.



На рисунке 27 показан отрезок системы индуктор-загрузка, выделенный по границам одного элемента дискретизации с координатами точек разбиения y_j и y_{j+1} . На поверхности наплавляемой детали 1 показан слой шихты 2. Распределение внутренних источников по длине индуцирующих токопроводов 3, а также функции внутренних источников в сечении $abcd$ могут быть с достаточной точностью установлены методом магнитных схем замещения.



Считаем, что для каждого элемента его магнитная проницаемость и удельное электрическое сопротивление постоянны во всех точках в данном временном слое. Такое допущение можно обосновать тем, что глубина проникновения тока для стальных деталей на применяемых частотах не превышает 2-3 мм. В пределах этих величин изменение электрофизических свойств по глубине незначительно.

Для расчета температурного поля в дискретных элементах области загрузки запишем третью краевую задачу теплопроводности для гомогенной изотропной среды:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + f(x, t), 0 < x < 1, t > 0; \quad (11)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial t} = \alpha (T - T_c), x = 0, t \geq 0;$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial t} = -\alpha (T - T_c), x = 1, t \geq 0;$$

$$f(x, t) = \frac{F(x, t)}{c\rho}, \quad (12)$$

Задача может быть решена методом разделения переменных путем представления искомого решения в виде ряда Фурье по собственным функциям задачи Штурма – Лиувилля с граничными условиями III рода.

На рисунке 28 показаны временные температурные кривые, полученные расчетом для установившегося режима системы для средних точек поверхности двух дискретных элементов, выделенных в утолщении (кривая 1) и в более тонкой части (кривая 2).

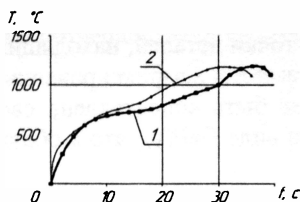


Рисунок 28. Изменение температуры в средних точках поверхности:
1, 2 – дискретные элементы

На рисунке 29 показаны кривые, задаваемые в виде кусочно-постоянных функций изменения плотности внутренних тепловых источников $F(x, t)$ при $x = 0$, действующих в утолщенной (кривая 1) и более тонкой (кривая 2) частях детали, полученных расчетом. Эти кривые при данной технологической схеме процесса индукционной наплавки, как следует из расчетов, соответствуют наиболее благоприятному выбору всей совокупности управляющих технологических параметров.

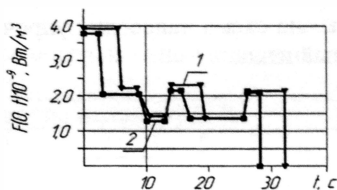


Рисунок 29. Изменение плотности внутренних тепловых источников при наплавке односторонних лап культиваторов

В таблице 4 приведены экспериментальные и расчетные значения температуры в точках поверхности детали на границе металл-шихта, соответствующие границам дискретных элементов при суммарном времени нагрева, равного 20 с для каждого рассчитываемого участка.

Модель позволяет оценивать производительность, качество наплавляемого слоя, получать информацию о потреблении энергии от внешнего источника питания и выделения ее в нагреваемых деталях, подбирать управляемые параметры.

Модель применялась при разработке технологических процессов индукционной наплавки лемехов, односторонних стрельчатых лап, культиваторов, ножей землеройных машин и других деталей переменного сечения.

По результатам проведенных теоретических и экспериментальных данных разработаны новые технологические процессы индукционной наплавки и борирования, а также конструирование рабочих органов.

Современные конструкции и способы упрочнения рабочих органов сельскохозяйственных машин должны быть такими, чтобы износ и тяговое усилие были минимальными, но при этом обеспечивалось соблюдение агротехнических требований.

Таблица 4.

Экспериментальные и расчетные значения температуры на границе шихты металла

у, мм	$T_{\text{расч.}}, \text{ К}$	$T_{\text{эксп.}}, \text{ К}$	$\Delta T, \text{ К}$	$\Delta T_{\text{отн.}}, \%$
0	1313	1373	333	5,5
40	1313	1353	313	3,7
80	1313	1360	323	4,6
120	1313	1323	283	0,9
160	1313	1293	293	1,2
200	1313	1303	283	1,0
240	1313	1343	303	2,8
280	1313	1433	393	10,3
320	1188	1213	298	2,7
360	1188	1233	318	4,7
400	1188	1218	303	3,2

На рисунке 30 показана схема нанесения упрочняющего покрытия, обеспечивающего минимальный износ.

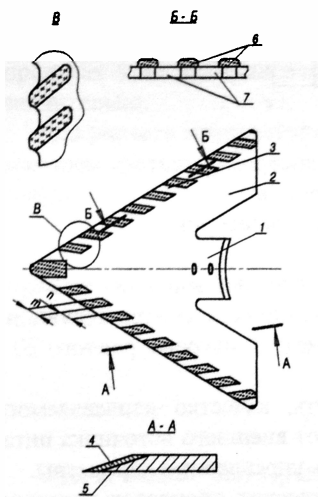


Рисунок 30. Схема нанесения твердого сплава с последующим высокоэнергетическим нагревом (импульсный нагрев):

- 1, 2 – хвостовик и крыло стрелчатой лапы;
- 3 – упрочненный слой на лезвийной поверхности;
- 4 – поперечное сечение упрочненного слоя;
- 5 – основной металл

В связи с этим был разработан рабочий орган для сельхозмашин, в котором по мере затупления и изменения формы лезвия, вызванного абразивным изнашиванием при эксплуатации, не создавались условия, когда на поверхности лезвия частицы почвы останавливаются перед ним и вдавливаются в почву.

Также был разработан и технологический процесс, позволяющий одновременно осуществлять наплавку твердого сплава и закалку отдельных частей рабочих органов в специальном индукторе (рис. 31).

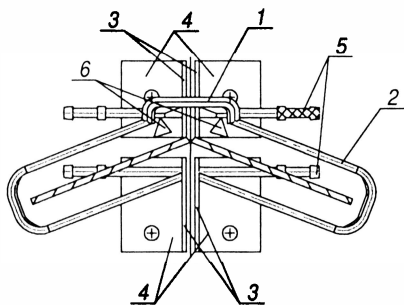


Рисунок 31. Индуктор для одновременной наплавки носовой части стрелчатой лапы и закалки ее крыльев:

- 1, 2 – наплавочный и закалочный виток;
- 3 – токопровод; 4 – пластина для присоединения к генератору;
- 5 – штангер;
- 6 – профилированная трубка для плавления шихты

Рабочие органы новой конструкции, изготовленные из сталей 50, 50ХГА и 65Г по новой технологии, дополнительно подвергались борированию с последующим испытанием упрочненного слоя в полевых условиях (табл. 5).

Относительный износ поверхностно-упрочненных стрелчатых лап

Шифр обмазки	Износ по параметру l_x , %					Схема установки на ПК
	B	b	l	S	m	
I-2-БП, О	12,1	17,2	20,7	33,8	28,6	первый ряд
II-1-П, О	12,7	27,9	21,5	33,4	34,5	второй ряд
III-1-БП, О	12,3	16,8	20,9	34,9	28,6	первый ряд
III-2-П, О	19,1	22,4	29,6	41,2	33,3	второй ряд
V-2-БП, З	9,9	8,8	13,7	23,5	19,1	первый ряд
V-2-БП, З	9,3	16,3	13,2	25,2	25,0	второй ряд
IV-1-БП, О	27,4	33,8	30,0	49,4	44,1	первый ряд
IV-2-П, О	28,2	52,3	33,3	51,8	55,9	второй ряд
I-1-БП, О	8,4	11,1	13,6	23,5	20,2	первый ряд
I-1-БП, З	13,4	13,1	18,9	31,1	22,6	второй ряд
VI-2-П, З	25,9	36,4	31,3	50,5	35,7	первый ряд
Контроль	19,9	43,6	32,5	50,4	40,5	второй ряд

Из данных таблицы 5 следует, что влияние исследованных технологических факторов на износ упрочненного рабочего органа в реальных условиях неоднозначно. Так, вне зависимости от варианта нанесения обмазки на поверхность стрелчатых лап у всех поверхностно-упрочненных образцов наблюдается износ от 8 до 27% по отдельным размерным параметрам, в то время как контрольные стрелчатые лапы в аналогичных условиях (как подвергнутые объемной закалке, так и трехступенчатому упрочнению) изнашиваются от 25 до 40%.

Внешний вид коммерческих стрелчатых лап показан на рисунке 32.

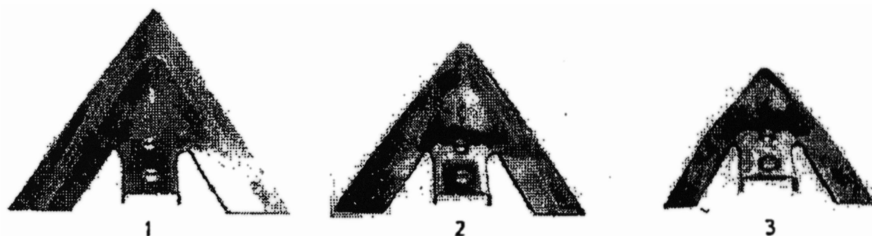


Рисунок 32. Фотографии изношенных стрелчатых лап:

- 1 – исходная лапа; 2 – упрочненная по схеме IV-1-БП после испытаний;
- 3 – коммерческая (производства ОАО «Авторемзавод «Леньковский»), подвергнутая объемной закалке, поверхностной ТВЧ-закалке и электроискровому упрочнению, HRC₃-50 после испытаний

Полученные результаты свидетельствуют о том, что между износом наплавленного слоя одинаково поверхностно-упрочненных рабочих органов по отдельным размерным параметрам существует определенная взаимосвязь, и, несмотря на большие значения некоторых параметров (l_b , l_b , l_l), стрелчатые

лапы все же сохранили свою работоспособность до конца эксперимента. Это свидетельствует о более сильной связи работоспособности изнашиваемой стрелчатой лапы не с ее отдельными геометрическими параметрами, а со способностью к сохранению общей стреловидной формы.

Поэтому предложено: износ поверхностно-упрочненных лап характеризовать интегральными показателями – изменением площади перекрытия (J_s) и средним весом.

В седьмой главе описываются оригинальные технологические процессы индукционной наплавки рабочих органов: стрелчатых лап, молотков, кормодриловок, технология восстановления стрелчатых лап зарубежного производства и регистрация температуры поверхности нагреваемых ТВЧ деталей (рис 33-38).

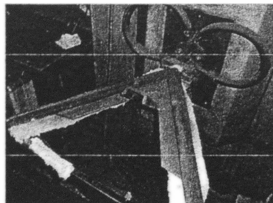


Рисунок 33. Индуктор, подключенный к высокочастотному ламповому генератору ВЧГЗ 160/0,066 для наплавки стрелчатых лап.

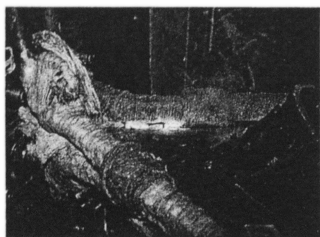


Рисунок 34. Термоиндикаторы, регистрирующие температуру поверхности детали при температурах 750 и 1250 °Т (начало плавления флюса и наплавляемого сплава)

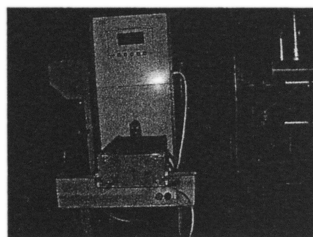


Рисунок 35. Индуктор для индукционной наплавки молотков кормодриловок, подключенный высокочастотному генератору «ЭЛИСТ 120 ПЗ»

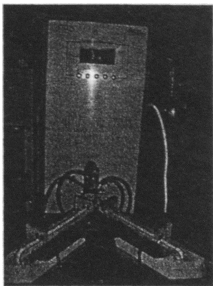
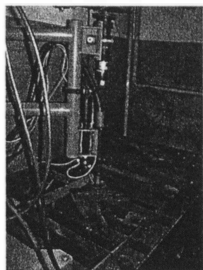


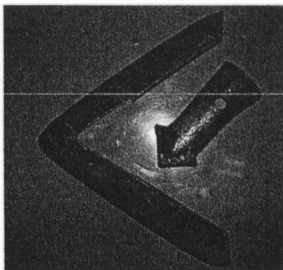
Рисунок 36. Стрельчатая лапа «АЛТАЙ» расположенная в индукторе для наплавке шихты с различными составами



Рисунок 37 Наплавленная лапа «Алтай» различными составами шихты



а



б

Рисунок 38 Плазмотрон (а) и вырезанный хвостовик (б) у импортной стрельчатой лапы для последующей сварки его к крыльям и индукционной наплавке носовой части

Экономическая эффективность только от внедрения упрочнения индукционной наплавкой с электроискровым методом молотков кормодрибл и других быстроизнашиваемых деталей составила более одиннадцати миллионов рублей в год, за что была присуждена государственная премия Алтайского края за 2009 г. А оригинальная технология восстановления стрельчатых лап импортного производства позволяет фермеру экономить только на одной детали 800 рублей.

Необходимо отметить, что среди сельскохозяйственных орудий почвообрабатывающие рабочие органы имеют наиболее низкий коэффициент равноустойчивости. Так, по данным ГОСНИТИ, для пятикорпусного прицепного плуга он составляет 0,433. Основная причина — низкая износостойкость не наплавленных лемехов, отвалов, полевых досок. При применении в тех же условиях наплавленных лемехов коэффициент повышается на 18,5%, достигая 0,510, а по предлагаемым технологиям — на 35% и 0,640. Индукционная наплавка дает значительную экономию металлопроката. Так, норма расхода металлопроката на

один лемех П-01021А составляет 5,7 кг. Наплавка 170 г твердого сплава увеличивает его работоспособность в два раза, то есть экономится металлопрокат одного лемеха. То же самое по другим деталям. Так, норма расхода у полевой доски П-01565 составляет 3,14 кг, наплавляется 100 г; отвала П-01560 – соответственно, 16, 185 кг и 200 г. Индукционная наплавка обеспечивает ежегодную экономию 150 тыс. т металлопроката только по заводам сельскохозяйственного машиностроения.

Основные результаты и выводы

Проведенные в диссертационной работе исследования позволили разработать технологии упрочнения рабочих органов сельскохозяйственных машин износостойкими покрытиями, в которых в процессе наплавки не изменяются изначально заложенные эксплуатационные свойства.

Для решения этой проблемы проведен комплекс теоретических и экспериментальных исследований, который позволил разработать оригинальные методики получения однородной структуры при индукционной наплавке высоколегированных хромистых заэвтектических чугунов на углеродистые и низколегированные стали.

Основой методологии является разработка возможности управления фазовым составом, структурой и механическими свойствами в наплавленных слоях в высоколегированных хромистых заэвтектических чугунах в процессе индукционной наплавки на углеродистые и низколегированные стали. Выявленные закономерности и установление взаимосвязи между параметрами износостойкого слоя позволили сделать научные обобщения с единой научно - технической позиции.

Теоретический анализ взаимодействия фаза – структура – свойство упрочняемых материалов создало условия для разработки модели образования однородной структуры в наплавленном слое в высоколегированных хромистых заэвтектических чугунах в процессе индукционной наплавки на углеродистые и низколегированные стали.

На основании разработанной методологии предложены способы упрочнения, конструкции рабочих органов сельскохозяйственных машин, новые сварочные (наплавочные) материалы, технологические процессы, обеспечивающие выполнение агротехнических мероприятий рабочих органов сельскохозяйственных машин в течение всего периода обработки почвы, а также переработки продуктов растениеводства.

На основании вышеизложенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Систематизированы факторы, из которых основными являются: проплавление основного металла и перемешивание его с твердым сплавом, диффузия углерода и химические процессы, приводящие к образованию новых карбидных и боридных фаз (Fe_3C , Fe_{23}C_6 , Cr_7C_3 , Cr_{23}C_6 , $(\text{Fe,Cr})_3\text{C}$, $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$, $(\text{Fe,Cr})_{23}\text{C}_6$, FeB , Fe_2B , $\text{Fe}_3(\text{C,B})$, $\text{Fe}_{23}(\text{C,B})_6$, $(\text{Fe,Mn})_2\text{B}$), влияющие на формирование неоднородной структуры, образующейся в высокохромистых белых заэвтектиче-

- ских чугунах систем Fe-C-Me, Fe-C-B-Me, Fe-C-Si-Me, где Me – элемент(ы) Cr, Mn, Ni, Cu, при их индукционном плавлении на упрочняемой поверхности углеродистых и низколегированных сталей (50, 60, 65Г, 50ХГА).
2. Предложена физико-химическая модель индукционной наплавки, описывающая взаимодействие расплавленных металла и шлака, что позволяет на стадии проектирования технологических процессов прогнозировать химический состав и, следовательно, эксплуатационные свойства наплавляемого твердого сплава.
 3. Созданы новые способы и составы термоиндикаторов для регистрации температуры на поверхности основного металла, метод определения температуры плавления многокомпонентной порошковой смеси, способ измерения температуры на границе слоев «основной металл – шихта – атмосфера» для исследования протекания тепловых процессов на межфазной границе «упрочненный сплав + основной металл».
 4. Предложена физическая и математическая модели нагрева токами высокой частоты многослойного материала при осуществлении фазового перехода (плавления) в одном из его слоев. С помощью предложенной модели исследовано изменение во времени температуры на границах слоев в процессе биметаллического соединения «65Г-ПГ-С27» в стационарном режиме. Расхождение расчетных значений температуры с экспериментальными составило 5-8%.
 5. Установлено влияние инокулирующих добавок углеродистого феррохрома ФХ-800 в сплавах ПС-14-60 и ПС-14-80 на структуру и механические свойства упрочняющего покрытия на 50, 60, 65Г, 50ХГА сталях. При содержании феррохрома в шихте от 80 до 92% в структуре покрытия полностью исчезает доэвтектическая зона и на 20-25% увеличивается износостойкость.
 6. Показано, что предварительная обработка поверхности упрочняемого металла электроискровым легированием спеченным сплавом ВК8 на глубину 100-300 мкм приводит к формированию на границе упрочняемый металл-сплав, при индукционной наплавке, к однородной структуре защитного покрытия, свободной от доэвтектической зоны. Исчезновение структурной неоднородности происходит вследствие диффузионного насыщения углеродом основного металла из вольфрамокобальтовой прослойки при его подплавлении. Достигаемая при этом степень перегрева твердого сплава до 40% позволяет при его кристаллизации формировать однородную структуру.
 7. Установлено, что насыщение упрочняемой поверхности бором и введение в состав наплавочной шихты боросодержащих компонентов ($V_{\text{аморф}}$, V_4C , ферробор) приводит к образованию новой структуры упрочняющего покрытия, предотвращению формирования доэвтектической зоны, повышению микротвердости и износостойкости. На поверхности упрочняемого металла и в наплавленном слое создаются упрочняющие фазы Fe_2B , FeB , $Fe_3(C,B)$, а на границе основной металл-сплав со стороны основного металла – перлитная прослойка.
 8. Установлено влияние повышенной частоты ВЧ-поля (880 кГц) на процесс формирования и характеристики износостойкого покрытия на основе высоко-

кохромистого белого чугуна ПГ-С27 на сталях Ст3, 65Г и 50ХГА. При индукционной наплавке на частоте 880 кГц на границе основной металл-сплав со стороны твердого сплава образуются только отдельные включения зерен дозвтекτικής структуры, которые практически не влияют на износостойкость покрытия.

9. По результатам проведенных исследований предложены новые методы упрочнения лезвийной поверхности рабочих органов индукционной наплавкой порошковыми материалами из высоколегированных хромистых белых чугунов и смеси механической типа «ПС» на сталь 65Г, 50ХГА и повысить их относительной износостойкости в 2,0-2,5 раза по сравнению с деталями, упрочненными известными методами, кроме того, уменьшение тягового сопротивления при их движении в рабочей среде на 6-8% и увеличения эффективности агротехнических мероприятий.

Список опубликованных работ по теме диссертации

Монографии

1. Иванайский, В.В. Физико-химические и технологические основы управления структурой и свойствами защитного износостойкого покрытия на рабочих органах сельхозмашин: монография / **В.В. Иванайский**. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2010. – 187 с.
2. Кориков, А.М. Моделирование, исследование и автоматизация инерционной сварки: монография / А.М. Кориков, В.И. Егоров, **В.В. Иванайский**, Р.К. Ахмедзянов. – Томск: Томский государственный университет, 1989. – 156 с.
3. Ишков, А.В., Иванайский В.В., Кривочуров Н.Т., Мишустин Н.М., Шайхудинов А.С. Получение износостойких и защитных покрытий на рабочих поверхностях почвообрабатывающих органов сельхозтехники: современное состояние и перспективы направления исследований. Обзор / А.Д. Алмазова, Е.А. Бадмаева, С.Н. Бережко и др. // Научные исследования, информация, анализ, прогноз: монография. Кн. 35. Гл. X. / Общ. ред. О.И. Кирикова. – Воронеж : Изд-во ВГПУ, 2011. – С. 156-176.

Статьи в периодических журналах перечня ВАК

1. **Иванайский, В.В.** Контроль температуры и плавление многокомпонентной шихты при индукционной наплавке / В.В. Иванайский, Н.Т. Кривочуров, Е.А. Иванайский // Сварочное производство. – 2007. – № 9. – С. 11-12.
2. Беляев, В.И. Проблемы использования сельхозмашин и орудий / В.И. Беляев, Н.Т. Кривочуров, **В.В. Иванайский** // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2007. – № 3. – С. 54-56.
3. Балаганский, А.Ю. Моделирование процесса индукционной наплавки деталей переменного сечения / А.Ю. Балаганский, **В.В. Иванайский** // Сварочное производство. – 2010. – № 4. – С. 18-22.
4. Иванайский, В.В. Индукционная наплавка твердыми сплавами на частоте 880 кГц / **В.В. Иванайский**, Н.Т. Кривочуров, М.Б. Желтунов, А.В. Коваль // Технология машиностроения. – 2009. – № 5. – С. 22-23.

5. Кривочуров, Н.Т. Способы контроля тепловложения при индукционной наплавке / Н.Т. Кривочуров, **В.В. Иванайский**, Е.А. Иванайский, В.Я. Деризин // Вестник АГАУ. – 2007. – № 3. – С. 61-62.
6. Иванайский, В.В. Анализ методов упрочнения рабочих органов / **В.В. Иванайский**, Н.Т. Кривочуров, М.П. Желтунов, А.С. Шайхудинов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2009. – № 8. – С. 41-43.
7. Иванайский, В.В. Технология восстановления стрелчатых лап зарубежного производства / **В.В. Иванайский**, Н.Т. Кривочуров, А.С. Шайхудинов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2010. – № 7. – С. 41-43.
8. Беляев, В.И. Обоснование влияния тягового сопротивления на параметры износа стрелчатых рабочих органов / В.И. Беляев, Н.Т. Кривочуров, **В.В. Иванайский**, А.С. Шайхудинов, Ю.Е. Зыга // Вестник АГАУ. – 2009. – № 10. – С. 92-95.
9. Ишков, А.В. Влияние природы борирующего агента, флюсов и активаторов на характеристики покрытий, полученных при скоростном борировании легированных сталей / А.В. Ишков, **В.В. Иванайский**, Н.Т. Кривочуров, А.А. Максимов, Н.М. Мишустин // Ползуновский вестник. – 2010. – № 3. – С. 201-203.
10. Ишков, А.В. Износостойкие боридные покрытия для почвообрабатывающих органов сельхозтехники / А.В. Ишков, Н.Т. Кривочуров, Н.М. Мишустин, **В.В. Иванайский**, А.А. Максимов // Вестник АГАУ. – 2010. – № 9. – С. 71-75.
11. Ишков, А.В. Влияние технологических факторов на износ поверхностно-упрочненных стрелчатых лап / А.В. Ишков, Н.Т. Кривочуров, Н.М. Мишустин, **В.В. Иванайский**, А.А. Максимов // Вестник АГАУ. – 2010. – № 10. – С. 93-96.
12. Балаганский, А.Ю. Упрочнение длинномерных рабочих органов сельхозтехники односторонней автоматической индукционной наплавкой / А.Ю. Балаганский, **В.В. Иванайский**, Н.Т. Кривочуров, В.П. Тимошенко, А.С. Шайхудинов, А.В. Ишков // Вестник АГАУ. – 2011. – № 7. – С. 89-93.
13. Резинов, В.Г. Об одной модели ТВЧ-нагрева многослойных материалов / В.Г. Резинов, **В.В. Иванайский**, С.Д. Дмитриев, А.В. Ишков // Известия АГУ. – 2011. – № 2/1. – С. 164 – 168.
14. Ишков, А.В. Моделирование физико-химических процессов в объеме и на фазовых границах биметаллического соединения, образующегося при индукционной наплавке / А.В. Ишков, **В.В. Иванайский**, С.М. Шанчуров, С.В. Пищиков // Ползуновский вестник. – 2011. – № 4-1. – С. 9-15.
15. Ишков, А.В. Поверхностное легирование чугунных отливок интерметаллидами / А.В. Ишков, Н.Т. Кривочуров, **В.В. Иванайский**, М.Г. Желтунов // Ползуновский вестник – 2010. – № 91. – С. 191-192.
16. **Иванайский**, В.В. Индукционная наплавка в разделку кромок высоколегированным белым чугуном деталей сельхозмашин / В.В. Иванайский, Н.Т. Кривочуров, Е.А. Иванайский, С.М. Шанчуров // Сварочное производство. – 2012. – № 1. – С. 42-45.
17. **Иванайский**, В.В. О выборе сталей для изготовления почвообрабатывающих органов сельхозтехники, упрочняемых методом индукционной наплав-

- ки / В.В. Иванайский, А.В. Ишков, Н.Т. Кривочуров, В.П. Тимошенко. // Вестник АГАУ. – 2012. – № 4. – С. 70-74.
18. Мишустин, Н.М. Состав, структура и свойства износостойких покрытий, полученных на сталях 65Г и 50ХГА при скоростном ТВЧ-борировании/ Н.М. Мишустин, **В.В. Иванайский**, А.В. Ишков // Известия Томского политехнического университета. – 2012 – №2. – С.68-72.
19. **Иванайский, В.В.** Особенности моделирования тепловых процессов в деталях с переменным сечением при индукционном способе индукционной наплавки / В.В. Иванайский, А.В. Ишков, Н.Т. Кривочуров, С.М. Шанчуров, Е.М. Таусенев // Ползуновский вестник. – 2012. – №11. – С. 98-104.
20. Ишков, А.В. Боридные покрытия для почвообрабатывающей сельхозтехники: получение, структура и износостойкость в реальных условиях / А.В. Ишков, **В.В. Иванайский**, Д.В. Коваль., А.В. Кондрух., Н.М. Мишустин // Труды ГОСНИТИ. – Том 109. – Ч. 2. – С. 7-12.
21. **Иванайский, В.В.**, Ишков А.В., Селиверстов К.В., Дмитриев С.Ф. Исследование и моделирование температурных полей на фазовых границах в порошковых смесях, претерпевающих плавление и химическое превращение / В.В. Иванайский., А.В. Ишков, К.В. Селиверстов, С.Ф. Дмитриев // Ползуновский вестник. – 2012. – № 3/2. – С. 28-32.