

Иванайский Виктор Васильевич

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
УПРАВЛЕНИЯ СТРУКТУРОЙ И СВОЙСТВАМИ
ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ
ИЗ БЕЛЫХ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ
ХРОМИСТЫХ ЧУГУНОВ И ПСЕВДОСПЛАВОВ,
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**

Барнаул – 2012

Работа выполнена ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный аграрный университет».

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Шанчуров Сергей Михайлович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Радченко Михаил Васильевич, ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», зав. кафедрой

доктор технических наук, профессор
Штенников Василий Сергеевич, ФГБОУ ВПО «Ижевский государственный технический университет», зав. кафедрой

доктор технических наук, профессор
Смирнов Александр Николаевич, ФГБОУ ВПО «Кузбассукий государственный технический университет им. Т.Ф.Горбачева», профессор

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Омский государственный технический университет».

Защита состоится «29» марта 2012 г. в 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.004.01 при ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» по адресу: 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, тел. (факс) 8(3852) 29-07-65, e-mail: yuoshevtsov@mail.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

Автореферат разослан «_____» _____ 2012 г.

Ученый секретарь

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 псевдосплавов 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 твердого сплава на упрочняемой поверхности конструкционных и низколегированных сталей образуется химическая и структурная неоднородность, в которой относительная износостойкость различных зон изменяется от 0,55 до 1,0 относительно друг друга.

Одним из направлений повышения эксплуатационной долговечности и надежности рабочих органов сельскохозяйственных машин является создание основ управления структурой и свойствами износостойких покрытий из белых высоколегированных хромистых чугунов и псевдосплавов, сформированных индукционной наплавкой.

Важнейшая часть индукционной наплавки – это формирование на поверхности деталей износостойкого слоя, работающего в условиях интенсивного абразивного и ударно-абразивного износа. Для этого с успехом могут применяться металлосберегающие технологии индукционного упрочнения рабочих органов сельхозмашин. Не случайно в отрасли тракторного и сельскохозяйственного машиностроения индукционной наплавкой выполняется около 73% всех видов наплавочных работ.

Проведенный анализ условий эксплуатации рабочих органов сельхозмашин, упрочненных индукционной наплавкой, показал, что их преждевременный износ происходит из-за образования неоднородной структуры по сечению слоя при наплавке износостойких покрытий высоколегированных хромистых белых чугунов и псевдосплавов на углеродистые или низколегированные стали.

Эффективность производства и качество продукции неразрывно связано 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 системах Fe-Cr-C и Fe-Cr-C-B при индукционной наплавке.

Указанное направление может быть реализовано путем легирования износостойкого покрытия карбидообразующими элементами или насыщения бором, использования нагрева электромагнитным полем повышенной частоты, оптимизации состава шихты и дополнительного воздействия на наплавленный слой электрической дугой угольного электрода. Все это позволяет управлять формированием первичной структуры наплавленного слоя, а комбинация физико-химических и технологических воздействий дает совокупность новых научных и технических решений, позволяющих максимально повысить эксплуатационные характеристики упрочненных изделий.

Во-первых, фундаментальные исследования по созданию основ управления физико-химическими и технологическими свойствами износостойких покрытий на углеродистые и низколегированные стали проводились при финансовой поддержке РФФИ «проект № 11-08-980016-16-р_сибирь_a (Физико-химические основы создания эффективной эксплуатации износостойких покрытий на рабочих органах сельхозтехники).

Во-вторых, работа выполнялась в рамках создания новых эффективных участков по изготовлению наплавочной шихты для заводов «Целиноградсельмаш» (ЦСМ) г. Целиноград, «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.

В третьих, «Тематических госбюджетных работ по важнейшей тематике в НПО «АНИТИМ» в 1985-1986 гг.; хоз/договора 235/88 «Изготовление экспериментальной оснастки индукционной наплавки стрелчатых 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.

Цель работы – разработка научно обоснованного комплекса физико-химических **мероприятий** и технологических процессов, обеспечивающих повышение износостойкости покрытий из высоколегированных хромистых белых чугунов и псевдосплавов, сформированных индукционной наплавкой на конструкционные стали, создание на этой основе рабочих органов сельскохозяйственных машин с максимальным энергосбережением при обработке почвы и продуктов растениеводства.

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 псевдосплавов на углеродистые и низколегированные стали;

2) исследовать тепловые процессы, образование биметаллического соединения углеродистой стали с твердым сплавом с использованием

методологии вычислительного эксперимента, изучить влияние 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.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- в разработке методологии электрофизических и химических воздействий, обеспечивающих управление структурой, фазовым составом и механическими свойствами покрытий, полученных при упрочнении углеродистых и низколегированных сталей индукционной наплавкой в системах Fe-Cr-C и Fe-Cr-B-C;

- в установлении возможности формирования структуры и механических свойств высоколегированных хромистых белых чугунов и псевдосплавов, наплавленных индукционной наплавкой на углеродистые и низколегированные стали путем влияния повышенной частоты электромагнитного поля, ионокулирующих частиц, электрической дуги графитового электрода, поверхностного легирования, скоростного борирования упрочняемой поверхности и наплавочной шихты и определения взаимосвязи между составом, структурой и износостойкостью образованного покрытия;

- в разработке новых методов и приемов регистрации и измерения температуры на фазовых границах в объеме биметаллических соединений, сформированных индукционной наплавкой;

- в исследовании износостойкости упрочненных изделий в условиях приближенных к реальным;

- в разработке способов и измерения температуры нагрева упрочняемой поверхности, плавления наплавочной шихты;

- в создании термоиндикаторов для предупреждения вероятного образования нежелательных структур в наплавленном слое;

- в разработке новых способов и технологии упрочнения индукционной наплавкой и оптимизации конструкции рабочих органов сельскохозяйственных машин.

Новизна научно-технических решений подтверждена 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 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 детали от ржавчины, масел и других загрязнений при подготовке упрочняемой поверхности для скоростного борирования, разработан способ (пат. № 2361708) и шихта (пат. № 2361711).

На базе предложенных технических и технологических решений созданы и апробированы на предприятиях машиностроения, в фермерских хозяйствах стрельчатые лапы различных типов, долотообразные лемехи, молотки кормодробилок и другие рабочие органы.

На защиту выносятся:

1. Результаты комплексных исследований состава, структуры и свойств защитных покрытий, после индукционной наплавки на углеродистые и низколегированные стали;

2. Физико-химические и тепловые модели индукционной наплавки, учитывающие металлургические процессы при упрочнении твердыми сплавами лезвийной поверхности рабочих органов сельскохозяйственных машин;

3. Новые методы регистрации и измерение температуры упрочняемой поверхности и способ определения температуры начала плавления твердого сплава при индукционной наплавке порошковыми материалами

4. Экспериментально установленные закономерности образования однородной структуры в высоколегированных хромистых белых чугунах и псевдосплавах на лезвийной поверхности рабочих органов;

5. Комплекс результатов определяющих *основы* управления структурой и механическими свойствами покрытий из высоколегированных хромистых белых чугунов и псевдосплавов при интегрированном воздействии: повышенной частоты электромагнитного поля, инокулирующими частицами, электрической дуги графитового электрода, поверхностным легированием, скоростным борированием упрочняемой поверхности и наплавочной шихты;

6. Экспериментальные результаты, показывающие эффективность применения разработанных способов, методов, конструкций и технологий для производства рабочих органов сельскохозяйственных машин.

Личный вклад соискателя. Проведен выбор направления исследований, постановка цели и задач, разработка методологии исследований, непосредственное выполнение основных экспериментов и анализ полученных результатов, разработка технологических процессов индукционной наплавки рабочих органов для обработки почвы и продуктов растениеводства.

Автор выражает признательность коллективу кафедры «Технологии конструкционных материалов и ремонта машин» АГАУ профессору А.В. Ишкову, лично заведующему кафедрой ТКМ и РМ, доценту Н.Т. Кривочурову, ст. преподавателю А.С. Шайхудинову и ученому секретарю Уральского отделения Федерального экспертного Совета РФ к.т.н. В.В. Яковлеву.

Апробация работы. Основное содержание работы и ее отдельные положения доложены и обсуждены на Международных и Всероссийских конференциях:

- региональной научно-практической конференции «Перспективы развития nanoиндустрии Алтая. Анализ состояния патентно-лицензионной деятельности 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 апрель 2010 г.);

- XI Международной научно-технической конференции «Измерение, контроль, информатизация» (Барнаул, 15-18 мая 2010 г.);

- IX Международная двусторонняя Российско-Израильская конференция (Белокураха, 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 «Будущие машиностроение России, (ИМАШ РАН) (Москва, ноябрь 2010 г.);
- XII Международной научно-практической конференции «Новые материалы и технологии в машиностроении» (Брянск, ноябрь 2010 г.).
- Международная научно-практическая конференция «Алдамжаровские чтения-2011» (Костанай, декабрь, 2011 г.);
- VI Международная научно-практическая конференция «Аграрная наука сельскому хозяйству» (Барнаул, 3-4 февраля 2011 г.);
- III Международная научно-практическая конференция Актуальные проблемы сельского хозяйства горных территорий (Горно-Алтайск, 1-4 июня 2011 г.);
- V Всероссийская научно-практическая конференция «Исследования и достижения в области теоретической и практической прикладной химии» (Барнаул, 26-28 октября 2011 г.);

Участие в выставках: VIII Международная машиностроительная выставка «MASHEX-2010»; ВК «КРОКУС-ЭКСПО», октябрь 2010 г. (г. Москва); «Образование наноструктурированных боридных покрытий на сталях 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.);

Участие в заседаниях кафедр: «Сварочное производство и диагностика» МГТУ им Н.Э. Баумана (г. Москва, 2011 г.); «Малый бизнес в сварочном производстве» АлтГТУ им. И.И. Ползунова (г. Барнаул, 2011)

Публикации. По теме диссертации опубликовано 60 работ, в том числе три монографии, 14 статей в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией. Получено 15 авторских свидетельств и патентов РФ. Общий объем публикаций составил 547 стр.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из Введения, семи глав, Выводов, Списка литературы из 275 наименований, Приложения (акты внедрения). Работа изложена на 295 страницах текста, содержит 118 рисунков, 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 затвердевании и кристаллизации высоколегированных чугунов.

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 ТВЧ-нагрева многослойного материала с учетом фазового перехода (плавлением) в одном из слоев.

В качестве примера взят многослойный материал, состоящий из плоской заготовки конечной длины, на которую насыпана шихта, затем заготовка помещается в высокочастотное электромагнитное поле (щелевой индуктор) одновременно нагревающая заготовку с двух сторон (рис. 1).

Наплавочная шихта 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 вихревых токов с материалом начинает выделяться тепловая энергия, которая нагревает пластину с шихтой до T_1 и расплавляет наплавочную шихту.

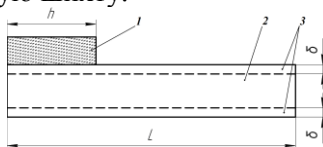


Рис. 1. Схема многослойного материала:

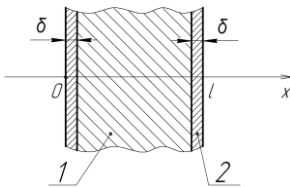
1 – расплавляемый слой;

2 – слой основного упрочняемого материала; 3 – скин слой

Допускаем:

- 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).



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

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

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

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=l} = -\alpha_1 [T_2(l,t) - T_c]; \quad (3)$$

Рис. 2. К решению задачи на первом этапе

где T_1 – температура пластины, $^{\circ}\text{C}$;

$a_1^2 = \frac{\lambda_1}{c_1 \rho_1}$ – коэффициент температуропроводности ($\text{Вт}/(\text{м}^2, ^{\circ}\text{C})$;

λ_1, c_1, ρ_1 – коэффициент теплопроводность ($\text{Вт}/(\text{м}, ^{\circ}\text{C})$; коэффициент удельной теплоемкости ($\text{Дж}/\text{кг } ^{\circ}\text{C}$) и плотности ($\text{кг}/\text{м}^3$) основного материала соответственно;

α_1 – коэффициент теплообмена основного материала с воздухом ($1/\text{м}$);

T_c – температура окружающей среды ($^{\circ}\text{C}$).

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

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

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

в которых к условиям, обозначенным выше, добавится условие теплового баланса на границе раздела фаз:

$$\lambda_2 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\xi(t)} - \lambda_3 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\xi(t)} = \lambda \rho \frac{d\xi}{dt}; \quad (6)$$

где $T_2(x,t)$ – температура расплава $^{\circ}\text{C}$;

$T_3(x,t)$ – температура шихты $^{\circ}\text{C}$;

α_2^2, α_3^2 – относительный коэффициент температуропроводности расплава и шлака соответственно ($\text{м}^2/\text{с}$);

λ_2, λ_3 – теплопроводности расплава и шлака соответственно (Вт/(м², °С);
 T_0 – температура пластины (она получается из решения задачи первого этапа) °С;

T_c – начальная температура шихты °С ;

T_p – температура плавления шихты °С ;

$\xi(t)$ – закон перемещения границы расплава;

λ – скрытая теплота плавления шихты (Дж/кг).

Тогда решением задачи на втором этапе будет:

$$T_2(x, t) = T_0 + \frac{T_p - T_0}{\operatorname{erf}\left(\frac{\alpha}{2\alpha_2}\right)} \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\alpha_2\sqrt{t}}\right); \quad (7)$$

$$T_3(x, t) = \frac{T_c \operatorname{erf}\left(\frac{\alpha}{2\alpha_3}\right) - T_p}{\operatorname{erf}\left(\frac{\alpha}{2\alpha_3}\right) - 1} + \frac{T_p - T_c}{\operatorname{erf}\left(\frac{\alpha}{2\alpha_3}\right) - 1} \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\alpha_3\sqrt{t}}\right). \quad (8)$$

Получено общее решение (уравнения 7 и 8) задачи изменения температуры многослойного материала при ТВЧ-нагреве. Расчет по данным уравнениям позволяет предложить математическую модель процесса 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.

На рисунке 3 приведены результаты расчетов нормализованной

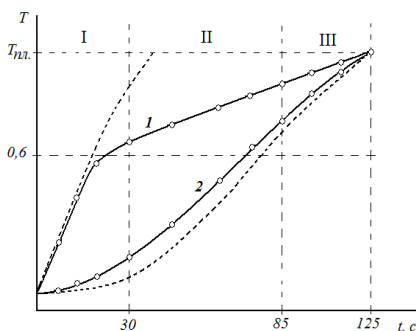


Рис. 3. Расчетное (---) и экспериментальное (—) изменение температуры во времени на границе металл-шихта 1 и границе шихта-воздух 2 в процессе получения биметаллического соединения «65Г-ПГ-С27» при стационарном ТВЧ-нагреве

температуры на границах слоев 2-1 и 1-окружающая среда для стационарного процесса ТВЧ-нагрева заготовки 17×100×5 мм из стали 65Г, покрытой слоем наплавочной шихты толщиной 5 мм, состоящей из 85 мас. % твердого сплава ПГ-С27 и плавящего 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 хро-

мель-алюмелевой микротермопарой.

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 $650-700^{\circ}\text{C}$, а на границе шихта-воздух температура достигает лишь $100-150^{\circ}\text{C}$. 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 зернами твердого сплава и основного металла образуется легкоплавкая эвтектика, имеющая для системы ПГ-С27 флюс П-0,66 температуру плавления $\sim 1100^{\circ}\text{C}$.

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.

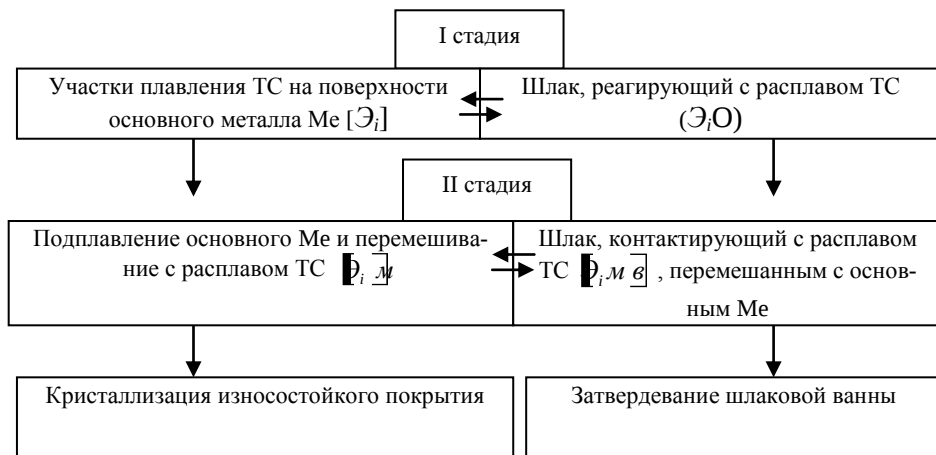


Рис. 4. Блок-схема взаимодействия фаз при индукционной наплавке

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

$$P_{i,j} = P_{i,j-1} - \frac{J_j S_j M \cdot 100}{v_{mj}}, \quad (9)$$

где: $P_{i,j}$ — содержание i -го элемента в металле, %;

J_j — скорость ухода элемента в шлак на стадии j , т. е. химической реакции, моль $\text{Э}_i / (\text{с}^2 \cdot \text{с}^2)$;

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 $x_{ок}$:

$$\frac{P_{i,ш}}{P_{i,д}} = x; \quad \frac{P_{i,ш}}{P_{i,ок}} = x_{ок} \quad (10)$$

где x и $x_{ок}$ — коэффициенты ликвации;

$(\sum_i n O_m)$ – 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).

Таблица 1

Содержание химических элементов в шихте и наплавленном сплаве

№ 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	1

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

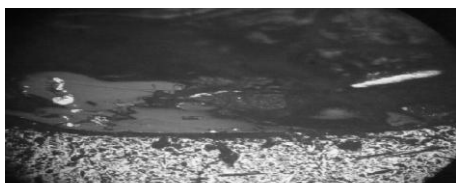


Рис. 5. Закристаллизовавшиеся частицы расплава (1) в шлаке (2)

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

В третьей главе разработаны: способ и состав (А.С. 1427164 А.С. 1520996), регистрации температуры начала плавления твердого сплава на упрочняемой поверхности детали является основным технологическим этапом, определяющим впоследствии физико-механические свойства наплавленного слоя. Этот фактор влияет на недогрев или перегрев наплавочной шихты, то и другое относится к браковочным признакам упрочненной поверхности.

Контролировать температуру нагрева поверхности детали в процессе наплавки традиционными способами (термопара, пирометр) не нашли применения в производстве по причине сложного аппаратного

оформления в первом случае, а во втором – большой погрешности при измерениях.

Определение температуры воспламенения термоиндикатора осуществляли следующим образом. После калибровки термопары ее подключали к АЦП К57 ПВ1А и осуществляли считывание ее показаний со скоростью до 36 с', оцифровку и передачу на персональную ЭВМ с установленным на ней ПО регистрации данных ADC.com, чтения данных и калибровки устройств ADC.mcd, функционирующем в системе Mathcad. Для серии параллельных измерений температуры использовали по три образца одинакового состава, которые зажигали на пластине по очереди при помощи базовой горелки (рис. 6).



Рис. 6. Воспламенение термоиндикатора при помощи газовой горелки

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

На рисунке 6 показана таблетка термоиндикатора, полученная из порошка алюминия АСД-1 и титана. Порошки смешивали в биконусном смесителе, формовали таблетки, а в качестве связующего использовали 1%-ный раствор канифоли в спирте.

Таким образом готовили и таблетки содержащие в своем составе компоненты (алюминий, оксид хрома, углерод).

Для контроля температуры воспламенения подготовленных таким образом образцов использовали вольфрамрениевую 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.

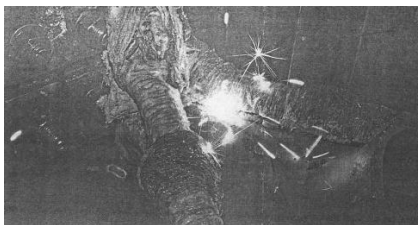


Рис. 7. Воспламенение термоиндикатора на поверхности детали,

нагреваемой токами высокой частоты

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

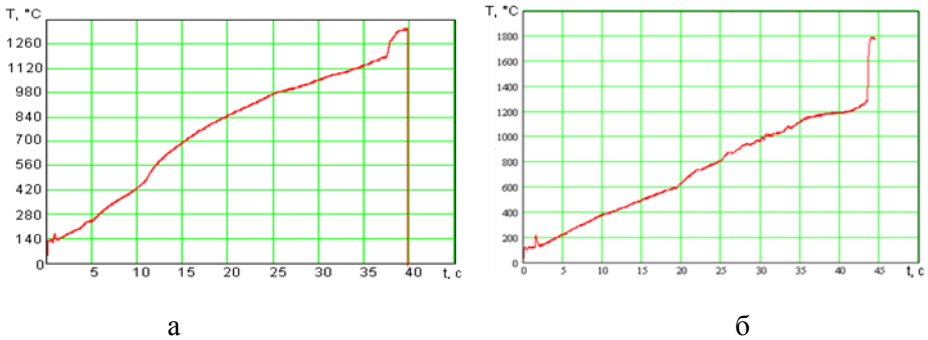


Рис. 8. Характерные температурные графики нагрева и воспламенения термоиндикаторов при толщине таблеток 1 мм (а) и 2 мм (б)

Измерения температуры нагреваемой токами высокой частоты поверхности детали производились с использованием состава порошков протекающие по термитным реакциям, а также металлов титана и алюминия, которые образуют между собой реакции самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (Пат. РФ № 7427808).

Разработан способ определения температуры плавления порошковой смеси (А.С. 1603268), 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 твердого сплава (0,8-12 мм) 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).

На рисунке 9 приведена схема определения температуры плавления наплавочной шихты.

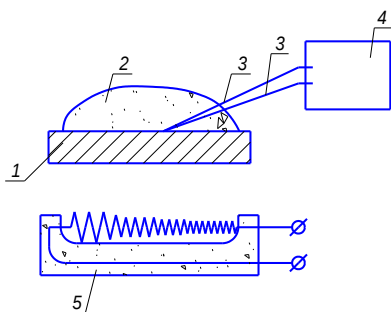


Рис. 9. Схема определения температуры плавления наплавочной шихты:

- 1 – упрочняемый металл;
- 2 – наплавочная шихта;
- 3 – термопара;
- 4 – компьютер;
- 5 – источник нагрева металла и плавки 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.

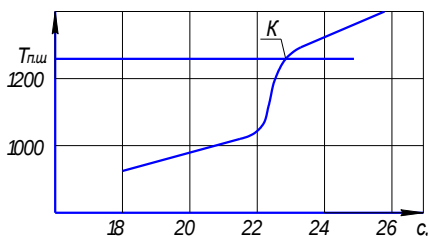


Рис. 10. Определение температуры плавления наплавочной шихты при индукционной наплавке

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 50-70°C, а ПГ-УС25 она составляла 60-70°C.

Важной составляющей процесса упрочнения индукционным методом является характер нагрева частицы в наплавочной шихте. Поэтому оптимизация их нагрева на упрочняемой детали невозможна без регистрации достаточной степенью точности ($\pm 10^{\circ\text{C}}$) 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 твердого сплава размером не менее трех диаметров электрода 1 термопары, а час-

тица 2 устанавливается в разделочную кромку приспособления 3, к частице прижимаются электроды. Затем конденсаторной сваркой к электродам приваривается частица твердого сплава.

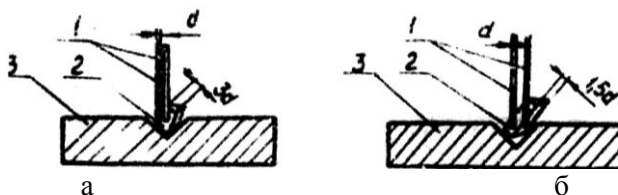


Рис. 11. Схема приварки двух электродов к одной (а) и двум (б) плоскостям:
1 – термоэлектрод; 2 – частица твердого сплава;
3 – приспособление для приварки частиц

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

Предлагаемый способ обеспечил измерение температуры нагрева твердого сплава с учетом требований, предъявляемых контактным датчиком температуры.

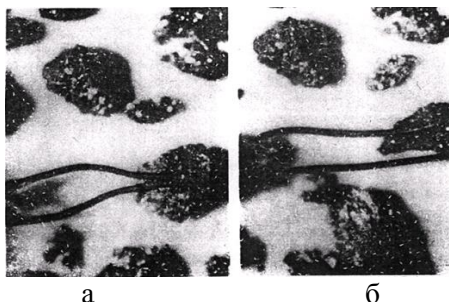


Рис. 12. Схема крепления термоэлектродов к одной (а) и двум (б) плоскостям (x20)

Этим методом измеряли температуру нагрева твердого 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.

Разработаны машина для испытания на абразивное изнашивание (Пат. РФ № 2328720) абразивная имитационная масса и способ ее получе-

ния (Пат. РФ № 2335752). Эти технические решения позволяют в лабораторных условиях оценивать износостойкость материалов, нанесенных любым методом на рабочую поверхность детали. Кроме того, разработанная система регистрации параметров режима и характеристик процесса обработки почвы производится в условиях, близких к реальным. При испытании изделий в искусственной почве можно создать основные физико-механические свойства: твердость, плотность, влажность, абразивность, изменение гранулометрического состава и как эти факторы влияют на тяговое усилие и износостойкость покрытий.

Система регистрации измерений параметров и характеристик обработки почвы приведена на рисунке 13.

Подобная система позволяет синхронно регистрировать и измерять тяговое усилие в зависимости от гранулометрического состава почвы, ее твердости и влажности. Для усиления сигнала, поступающего с тензорезистора, разработана и собрана специальная схема на базе операционного усилителя.

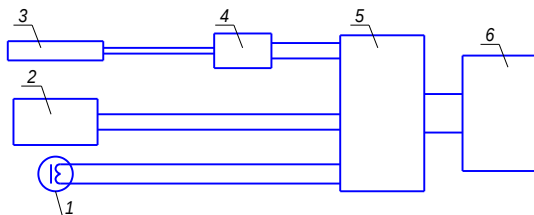


Рис. 13. Схема системы регистрации измерений параметров и характеристик процесса обработки почвы:

1 – датчик регистрации измерений твердости почвы; 2 – счетчик, определяющий длину пути при перемещении образца рабочего органа в абразивной среде; 3 – тензорезистор для измерения тягового усилия, создаваемого образцом при перемещении в почве; 4 – операционный усилитель; 5 – блок питания; 6 – компьютер

Регистрация сигналов, поступающих с тензорезисторов, датчиков, осуществлялась через системный блок компьютера и выводилась на монитор.

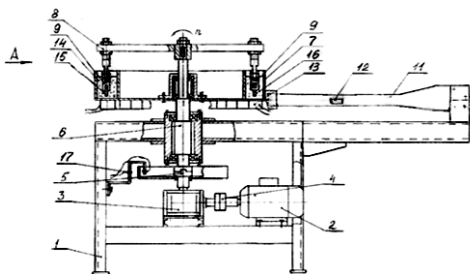
Преимущество разработанной системы по сравнению с другими в том, что она позволяет регистрировать и измерять основную характеристику рабочего органа.

Датчик длины пути регистрировал количество оборотов, совершенных экспериментальным образцом в абразивной массе.

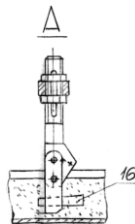
Схема расположения датчиков и устройство машины для испытания на абразивное изнашивание изображены на рисунке 14а, б.

Машина состоит из стола 1, в нижней части которого расположен электродвигатель 2, соединенный с редуктором 3 посредством муфты 4. Редуктор 3 через муфту 5 соединен с приводным валом 6, проходящим через центр барабана 7 и имеющим на своем верхнем конце траверсу 8 с кронштейнами 9 с креплениями 10 для испытываемых образцов. К столу 1 одним концом жестко закреплена штанга 11 с тензометрическим датчиком 12, а другой конец штанги 11 выполнен с возможностью взаимодействия с барабаном 7, под днищем барабана 7 установлены электромагниты 13, а в качестве абразивного материала в барабан 7 засыпают ферромагнитный материал 14. В креплениях 10 установлен испытываемый образец 15 и эталонный 16, к рабочему столу 1 крепится фотодиод 17.

Машина работает следующим образом. На валу 6, приводящемся во вращение электродвигателем 2 через редуктор 3, устанавливается барабан 7, свободно вращающийся на подшипниках. От вращения его удерживает штанга 11 с наклеенным на ней тензометрическим датчиком 12. В барабан 7 насыпают имитатор почвы, в нашем случае ферромагнитный материал 14, в нем на кронштейнах 9 при помощи крепления 10 на определенной глубине устанавливают испытываемый 15 и эталонный 16 образцы (рис. 14 б).



а



б

Рис. 14. Машина для испытания на абразивное изнашивание (а) и расположение образца в имитационной абразивной почве (б)

После включения электродвигателя 2 приводится во вращение траверса 8 с кронштейнами 9 с закрепленными образцами 15 и 16, которые перемещаются в ферромагнитном материале 14.

Образцы крепятся к штанге 11 с наклеенным на нее тензометрическим датчиком 12, фиксирующим усилие, испытываемое образцами в зависимости от состояния абразивной массы. Удельное давление регулируется электромагнитами 13, установленными под барабаном. Фото-

диод 17 регистрирует количество оборотов, совершаемых образцами в барабане 7.

Предлагаемая машина для испытания на абразивное изнашивание предельно проста в конструктивном исполнении, а ферромагнитный абразивный материал создает условия максимально приблизить процесс испытания образцов к среде эксплуатации рабочих органов.

Отличительной особенностью данной машины является то, что она позволяет изучать функциональные качества рабочих органов, оптимизировать конструктивные параметры, оценивать энергетические показатели.

Проведены стандартные методики измерения структуры фазового состава и химического анализа наплавленных износостойких покрытий из высоколегированных хромистых белых чугунов и псевдосплавов.

Экспериментальные исследования проводились с целью управления созданием однородной структуры в наплавленном слое и конструктивной оптимизации защиты от воздействия абразивного изнашивания при обработке почвы и продуктов растениеводства.

Основной задачей исследования являлось установление возможности управления структурой и фазовым составом посредством химических физических и технологических воздействий на наплавляемый слой из высоколегированного хромистого белого чугуна и псевдосплава.

При проведении исследований использовалось современное оборудование, обеспечивающее высокую точность и технологичность.

В четвертой главе проводились исследования по управлению формированию однородной структуры при упрочнении поверхностей деталей, выполненных из углеродистых и низколегированных сталей посредством компонентов 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 наплавляемом сплаве (рис. 15).

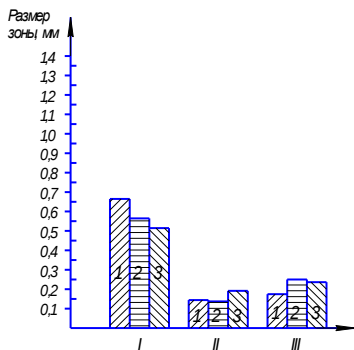


Рис. 15. Влияние различных флюсов на величину характерных зон в наплавленном слое:

1 – флюс завода АСМ; 2 – флюс завода ЦСМ;

3 – флюс завода ЗОР;

I – аэвтектическая зона,

II – доэвтектическая зона,

III – эвтектическая зона

Максимальный размер заэвтектической зоны в расплавленном слое наблюдается при наплавке шихты с флюсом завода АСМ, а минимальный размер – с флюсом завода ЗОР (рис. 16).

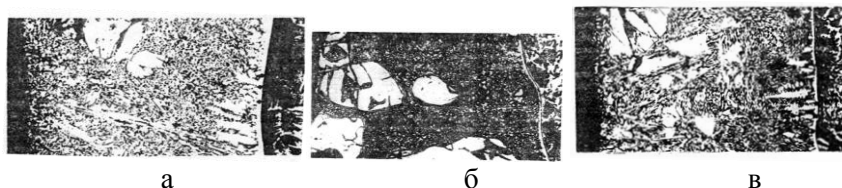


Рис. 16. Структуры наплавленного слоя с флюсами:
а – АСМ; б – ЦСМ; в – ЗОР

Микротвердость по высоте наплавленного слоя более равномерно распределяется при наплавке флюсом завода АСМ (рис. 17).

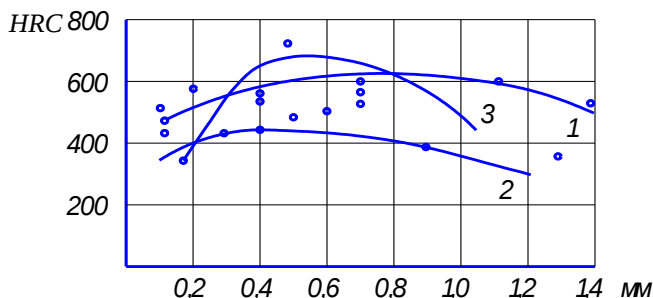


Рис. 17. Влияние различных флюсов на изменение микротвердости по толщине наплавленного слоя: 1 – флюс завода АСМ; 2 – флюс завода ЦСМ; 3 – флюс завода ЗОР

Для повышения физико-механических характеристик и срока службы деталей осуществляли борирование с применением технологии кратковременного высокоскоростного нагрева поверхности стальной детали (ТВЧ-нагрев) с нанесением на нее борировующего состава до температур образования новых фаз и эвтектик ($1100-1350^{\circ}\text{C}$) в системах Fe-B, Fe-B-C, Fe-Me-B-C, где Me – это легирующий элемент из группы Cr, Mi, Ni и т.п. (табл. 2).

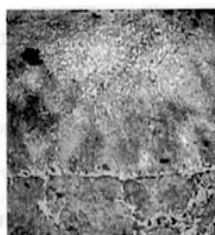
Их рентгенофазовый анализ показал присутствие фаз: $\alpha\text{-Fe}$, FeB и Fe_2B , $\text{Fe}_3(\text{C},\text{B})$, $\text{Fe}_{23}(\text{C},\text{B})_6$, мета- и ортоборатов железа (Fe_3BO_3 , Fe_3BO_6 , Fe_3BO_5), следы вюстита FeO и шпинели $\text{FeO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$, то есть при ТВЧ-

нагреве легированных углеродистых сталей под слоем флюса П-0,66, содержащего от 84 до 90% борлирующих агентов, на поверхности стали образуются сложные боридные покрытия. Для выяснения характеристик и структуры полученных слоев, а также состояния боридов, были изучены микрофотографии шлифов (рис. 18а-в).

Таблица 2

Состав исследованных борлирующих смесей, мас. %

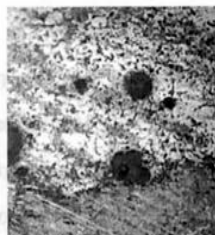
Смесь	Борлирующий агент	Активатор	Флюс
I	B ₄ C (90)	-	П-0,66 (10)
Ia	B ₄ C (84)	N H ₄ Cl (6)	П-0,66 (10)
II	B ₄ C (84)	-	П-0,66 (16)
IIa	B ₄ C (90)	CaF ₂ (5)	П-0,66 (5)
III	B (90)	-	П-0,66 (10)
IIIa	B (90)	CaF ₂ (5)	П-0,66 (5)



а



б



в

Рис. 18. Структура боридных покрытий на стали 65Г, полученных за 1 мин. из различных смесей ($\times 250$):
а – Ia; б – II; в – IIIa

Из рисунка 18 следует, что при выбранных температурных значениях времени борирования структура и состояние границы полученных износостойких слоев отличаются. Однако, в отличие от классических боридных иглообразных двухфазных слоев, на поверхности заготовок формируется более стойкая предпочтительная в условиях тяжелого абразивного, знакопеременного и ударного износа пластичная боридная эвтектика с выраженной или диффузионной границей. Изменений структуры основного металла из-за перегрева не наблюдается. Образуются боридные покрытия трех типов.

В таблице 3 приведены результаты микрорентгеноспектрального анализа покрытий 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 углеродным фазам от цементита и карбоборидов Fe до специальных карбидов и специальных карбоборидов Fe, Mn и Cr. В случае же осуществления высокоскоростного процесса ТВЧ-борирования создаются условия для образования метастабильных фаз, фаз переменного состава и твердых растворов 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. 19).

Таблица 3

Результаты микрорентгеноспектрального анализа
основных фаз в боридных покрытиях на стали 65Г и 50ХГА

Обозначение фазы, элементы	Описание фазы, морфология	Состав, элемент, %		Химическая формула
		весовой	атомный	
6■ - Fe, C, B	матрица – серое поле в ледебурито-подобной 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.

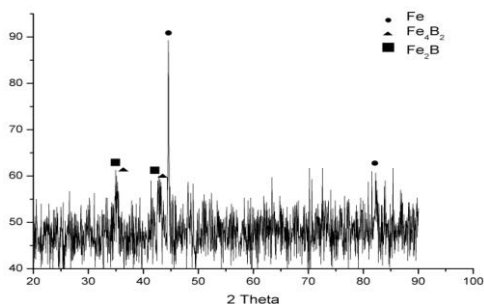


Рис. 19. Рентгенограмма боридного покрытия, полученного на стали 65Г за 1,5 мин. из смеси Па

Исследование распределения микротвердости полученных покрытий 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. 20).

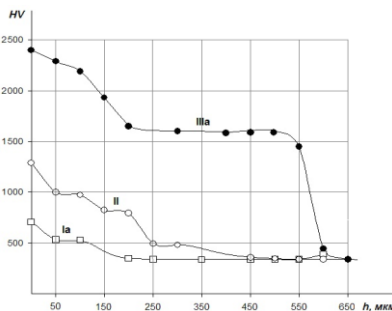
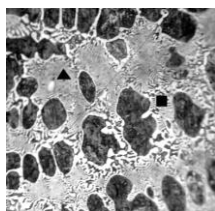


Рис. 20. Распределение микротвердости по глубине покрытий, полученных из различных боридующих смесей

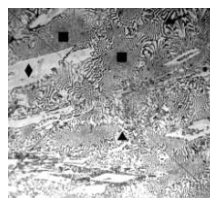
Боридные покрытия, полученные при ТВЧ-нагреве этих же образцов в течение 1,5 мин., имеют иную структуру (рис. 21а, б, в).



а



б



в

Рис. 21. Структура боридных покрытий на стали 65Г, полученных за 1,5 мин. из различных смесей (400 $\times$): а – I, б – Па, в – IIIa

Как следует из рисунка 21, при таких условиях борирования образуются структуры двух типов. Так, в покрытиях, 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, вы-

держанных при температуре 1200-1300°C в течение 1 мин., причем состав эвтектики изменяется в более светлых и темных участках. В эвтектической матрице наблюдаются равномерно распределенные замкнутые карбидные области (рис. 21а). Микротвердость образующегося покрытия 1450-1600 HV, 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. 20б, в). Микротвердость таких покрытий на стали 65Г достигает максимальных значений 2250-2350 HV, 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.

На рисунке 22 приведены типичные структуры боридных покрытий, полученных при ТВЧ-нагреве стали 50ХГА под борирующей обмазкой на основе B_4C и флюса П-0,66 без активатора (рис. 22а) и в присутствии 5 % фторида кальция (рис. 22б). Основой (матрицей) износостойкого покрытия в обоих случаях является железо-боридная эвтектика, однако для этой стали доля более твердых светлых областей в ее объеме значительно меньше, чем на образцах стали 65Г, борированных в течение 1 и 1,5 мин.

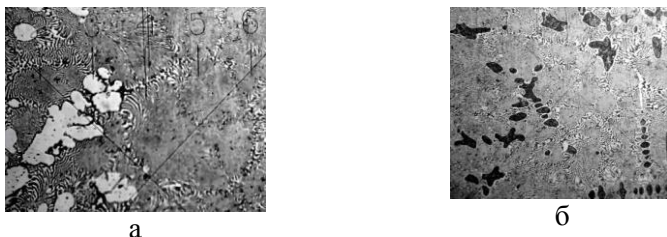


Рис. 22. Структура боридных покрытий на стали 50ХГА, полученных за 2 мин. из различных смесей (400 $\times$): а – I, б – IIа

Таким образом, хотя наиболее эффективной в процессе высокоскоростного борирования при ТВЧ-нагреве и оказалась обмазка на основе состава IIа, 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 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.

Основной металл в твердой фазе насыщается различными неметаллами или легирующими металлами при химико-термической обработке, на поверхности детали образуется износостойкий слой различных бинарных или более сложных соединений железа.

Исследование борирования жидкой фазы твердого сплава и одновременное борирование упрочняемой поверхности стали 65Г проводились посредством индукционного нагрева и плавления специальной наплавочной шихты, где часть флюса в пределах 6-8 % была заменена карбидом бора.



Рис. 23. Зона сплавления борированного твердого сплава (ПГ-С27) и стали 65Г (x300)

Расплавленный твердый сплав насыщается бором и углеродом и после кристаллизации образуется мелкодисперсная заэвтектическая структура микротвердостью 800-1200 HV (рис. 24). Борирование твердого сплава повышает его микротвердость на 70-80%.

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 включениями твердого ледебурита и отдельных строчечных включений перлита с содержанием бора до 1,2 %.

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

На рисунке 23 приведена микроструктура зоны сплавления борированного твердого сплава и упрочняемой поверхности.

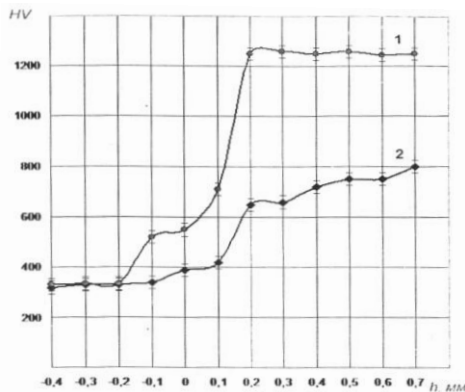


Рис. 24. Микротвердость зоны сплавления твердого сплава (кривая 1) и основного металла (кривая 2)

В зоне сплавления отсутствует дендритная зона. Это можно объяснить тем, что из карбида бора B_4C углерод и бор, и при частичном расплавлении основного металла они в него диффундируют.

В результате индукционной наплавки шихты, содержащей карбид бора, в наплавленном слое отсутствует доэвтекктическая зона, а микротвердость в 2,8-3,5 больше, чем у наплавленного сплава типа сармайт.

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

На рисунке 25а и 25б приведены структуры наплавленного твердого сплава (ПГ-С27 и ПС-14-60) на частоте 880 кГц.

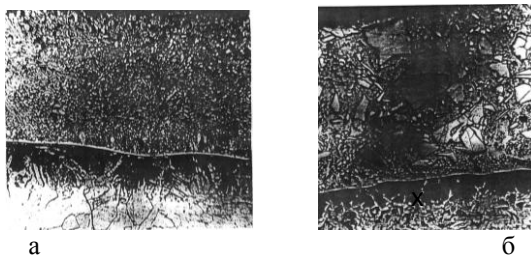


Рис. 25. Микроструктура образцов сплавов ПГ-С27 (а), ПС-14-60 (б), наплавленных на частоте 880 кГц (X100)

По линии соединения образуются только отдельные дендритные включения, что не оказывает существенного влияния на износостойкость.

Исследовалась возможность переплавления наплавленных участков графитовым электродом на обратной полярности. На рисунке приведены микроструктуры до воздействия (рис. 26 а) и после (рис. 26 б).

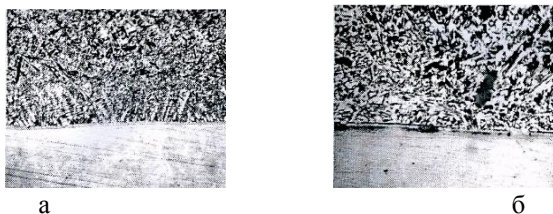


Рис. 26. Структура наплавленного слоя (x150) до (а) и после (б) его переплавления электрической дугой графитового электрода

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

На рисунке 27 приведены микроструктуры с поверхностным легированием (рис. 27 а) и без поверхностного легирования (рис. 27 б).

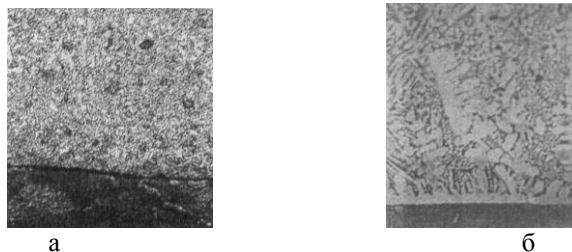


Рис. 27. Микроструктура наплавленного слоя (x150).

Электроискровое упрочнение + индукционная наплавка (а);
без электроискрового упрочнения при перегреве до 40% (б)

В зависимости от глубины легирования упрочняемой поверхности степень перегрева наплавляемого расплава может достигать 40 %.

Таким образом, показана возможность управления физическими методами структурой наплавляемого слоя при индукционной наплавке.

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.

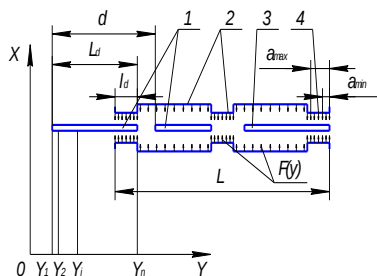


Рис. 28. Схема процесса индукционной наплавки деталей комбинированным способом

На рисунке 28 показано расположение деталей 1 с нанесенным слоем шихты 3 относительно токопроводов 2 индуктора в некоторый момент времени через слой расплава 4. Здесь же представлены и координатные оси. Предполагается, что ось Z направлена перпендикулярно плоскости чертежа. Если связать систему координат с индуктором и рассматривать любые точки деталей, находящихся в зоне его действия с фиксированными координатами x и z в фиксированный момент времени, то с каждой из этих точек может быть сопоставлена своя функция источников, которая может быть записана в виде $F = F(y)$, что в общем случае $F = F(x, y, z, t)$.

На рисунке 29 приведен отрезок системы индуктор-загрузка, выделенный по границам одного элемента дискретизации с координатами точек разбиения y_j и y_{j+1} .

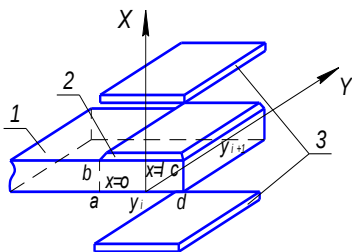


Рис. 29. Отрезок системы индуктор-нагрузка, выделенный по границе дискретного элемента

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.

Для каждого элемента считаем, что его магнитная проницаемость и удельное электрическое сопротивление с постоянными во всех точках на 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:

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

$$\lambda \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \alpha \left(\Phi - \Phi_{\text{н}} \right), \quad x = 0, \quad t \geq 0;$$

$$\lambda \frac{\partial \Phi}{\partial t} = -\alpha \left(\Phi - \Phi_{\text{н}} \right), \quad x = 1, \quad t \geq 0;$$

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

где a – коэффициент температуропроводности материала детали;

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C);

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°C);

l – толщина детали на расчетном участке, м;

T_c – температура окружающей среды, °C;

c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·°C);

γ – плотность, кг/м³.

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.

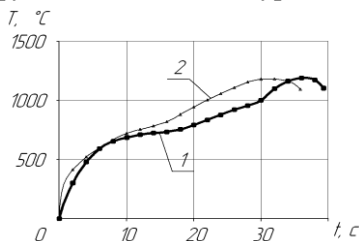


Рис. 30. Изменение температуры в средних точках поверхности:
1, 2 – дискретные элементы

На рисунке 32 приведены 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.

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 замлериных машин и других деталей переменного сечения.

Таблица 4

На рисунке 30 приведены 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).

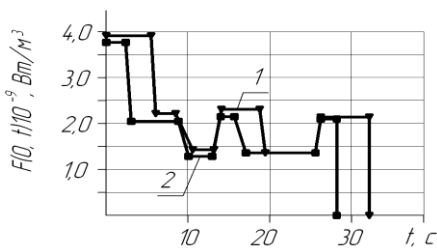


Рис. 31. Изменение плотности внутренних тепловых источников при наплавке односторонних лап культиваторов

Экспериментальные и расчетные значения температуры
на границе шихты металла

у, мм	$T_{\text{расч.}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{эсп.}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta T, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_{\text{отн.}}, \%$
0	1040	1100	60	5,5
40	1040	1080	40	3,7
80	1040	1090	50	4,6
120	1040	1050	10	0,9
160	1040	1020	20	1,2
200	1040	1030	10	1,0
240	1040	1070	30	2,8
280	1040	1160	120	10,3
320	915	940	25	2,7
360	915	960	45	4,7
400	915	945	30	3,2

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

Современные конструкции и способы упрочнения рабочих органов сельхозмашин должны быть такими, чтобы износ и тяговое усилие были минимальными, но при этом обеспечивалось соблюдение агротехнических требований. На рисунке 33 показана схема нанесения упрочняющего покрытия, обеспечивающего минимальный износ.

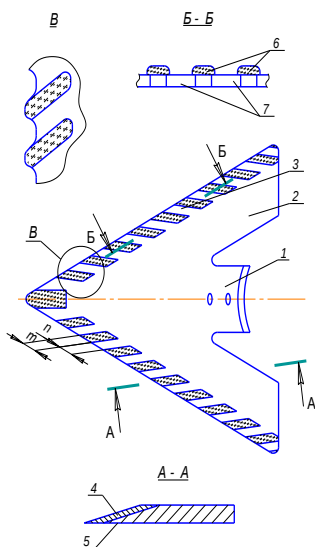


Рис. 32. Схема нанесения твердого сплава с последующим высокотемпературным нагревом (импульсный нагрев)

- 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, ко-

гда на поверхности лезвия частицы почвы останавливаются перед ним и вдавливаются в почву.

Разработан технологический процесс, позволяющий одновременно осуществлять наплавку твердого сплава и закалку отдельных частей рабочих органов в специальном индукторе (рис. 33).

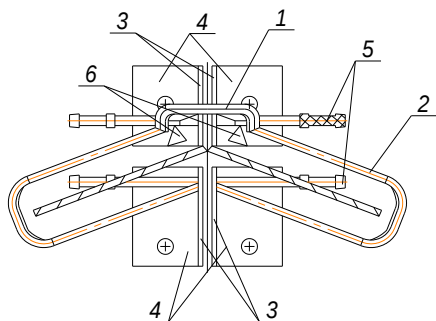


Рис. 33. Индуктор для одновременной наплавки носовой части стрелчатой лапы и закалки ее крыльев:
1, 2 – наплавочный и закалочный виток;
3 – токопровод; 4 – пластина для присоединения к генератору;
5 – штуцер;
6 – профилированная трубка для плавления шихты

Разработанный изготовленный индуктор может обеспечивать режимы упрочнения как сварной, так и штампованной лапы при индукционной наплавке носовой части и закалке крыльев.

Рабочие органы, изготовленные из сталей 50 и 50ХГА и 65Г, подвергались борированию с последующим испытанием упрочненного слоя в полевых условиях.

Таблица 5

Относительный износ поверхностно-упрочненных стрелчатых лап

Шифр обозначения	Износ по параметру l_x , %					Схема установки на ПК
	B	b	l	S	m	
1-2-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 не однозначен. 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 34.

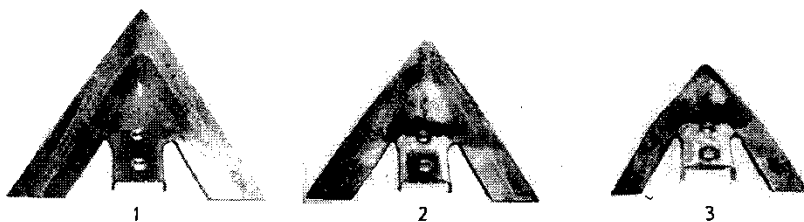


Рис. 34. Фотографии изношенных стрелчатых лап:

- 1 – исходная лапа; 2 – упрочненная по схеме IV-1-БП после испытаний;
3 – коммерческая (производства ОАО «Автомобильный завод «Леньковский»),
подвергнутая объемной закалке, поверхностной ТВЧ-закалке
и электроискровому упрочнению, HRC₅₀-50 после испытаний

Полученные результаты свидетельствуют о том, что между износом и 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_i) 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 полуавтоматическая линия и установка индукционной наплавки рабочих органов.

Выбор вида компоновки линии зависит от применяемого способа наплавки, конструктивных размеров наплавленных деталей и геометрических параметров ее упрочняемого участка, типа высокочастотного оборудования и т.д.

Рекомендуется для наплавки длинномерных деталей с протяженными участками упрочнения и постоянным сечением металла оборудования линейного типа (рис. 35 а, б).

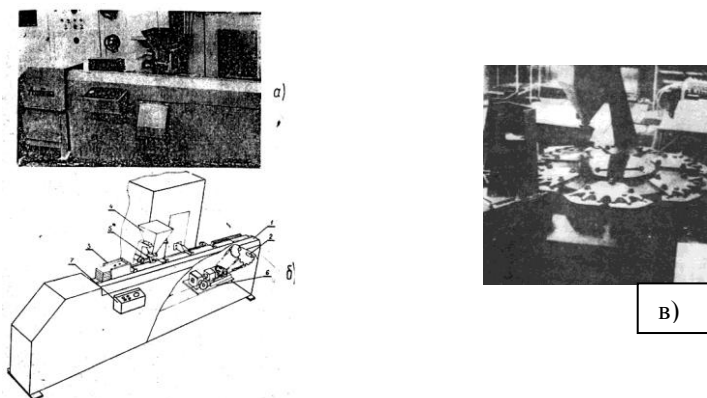


Рис. 35. Линия для наплавки полевой доски (а) и ее схема (б);
полуавтоматическая установка ножей культиватора КФС (в)

Производительность линии 90 деталей в час.

Полуавтоматическая установка индукционной наплавки ножей культиватора КФС обеспечивает наплавку ножей шести типоразмеров.

Ее производительность 480 деталей в час.

Технология упрочнения предусматривает, что при остывании изделия до температуры 840-860⁰С осуществляется процесс закалки ее в масле. После этой операции деталь подвергают низкому отпуску в печи при температуре 150-220⁰С в течение 1,5-2 ч.

Среди сельскохозяйственных орудий почвообрабатывающие имеют наиболее низкий коэффициент равностойкости. Так, по данным ГОСНИТИ, для пятикорпусного прицепного плуга он составляет 0,433. Основная причина – низкая износостойкость ненаплавленных 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.

Экономия составит:

$$C_{\text{рем}} = (B_{\text{г}}/B_{\text{рем}} - B_{\text{г}}/B_{\text{выб}})\ell_{\text{рем}},$$

где $B_{\text{г}}$ – годовая выработка агрегата;

$B_{\text{рем}}$ – наработка рабочего органа до ремонта;

$B_{\text{выб}}$ – наработка рабочего органа до выбраковки;

$\ell_{\text{рем}}$ – стоимость одного ремонта рабочего органа.

При этом необходимо добавить экономию от сокращения расхода горючего, которая образуется от снижения тягового сопротивления при использовании наплавленных режущих деталей, самозатачивающихся в процессе работы.

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 сельхозмаша.

Основные результаты и 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 чугунах и псевдосплавах 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 «твердый 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 псевдосплавы 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 образующегося покрытия.

6. Показано, что предварительная обработка поверхности упрочняемого металла электроискровым легированием спеченным сплавом ВК-5 на глубину 100-300 мкм приводит к формированию на границе упрочняемый металл-твердый сплав 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. Достижимая при этом степень перегрева твердого сплава до 40% позволяет при его кристаллизации формировать однородную структуру.

7. Впервые установлено, что введение в состав наплавочной шихты боросодержащих компонентов ($V_{\text{аморф.}}$, V_4C , ферробор) приводит к образованию новой структуры упрочняющего покрытия, исчезновению доэвтектической зоны, повышению микротвердости и износостойкости. На поверхности упрочняемого металла и в наплавленном слое формируются новые упрочняющие фазы Fe_2B , FeB , $Fe_3(C,B)$, а на границе основной металл-твердый 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 высокохромистого белого чугуна ПГ-С27 на сталях Ст3, 65Г и 50ХГА. При индукционной наплавке на частоте 880 кГц на границе основной металл-твердый сплав со стороны твердого сплава образуются только отдельные включения зерен доэвтектической структуры, которые практически не влияют на износостойкость защитного покрытия.

9. По результатам проведенных исследований предложены новые конструкции и методы упрочнения путем индукционной наплавки высоколегированных хромистых белых чугунов и псевдосплавов на сталь 65Г, 50ХГА, деталей типа молотка кормодробилки, сварной и цельноштампованной стрельчатой лапы, позволяющие повышать их относительную износостойкость по сравнению с деталями, упрочняемыми известными методами в 2,0-2,5 раза, уменьшить тяговые сопротивления при их движении в рабочей среде на 6-8% и повысить эффективность агротехнических мероприятий.

Список опубликованных работ по теме диссертации

Монографические исследования

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 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. Алматова, 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. – № 7. – С. 22-24.
5. Кривочуров Н.Т. Способы контроля тепловлажнения 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** и др. // 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 низколегированных сталей / А.В. Ишков, **В.В. Иванайский**, Н.Т. Кривочуров и др. // Ползуновский вестник. – 2010. – № 3. – С. 142-146.

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. Пишиков // Ползуновский вестник. – 2011. – № 4-1. – С. 9-15.

Авторские свидетельства и патенты

1. А.с. 1603268. СССР. Способ определения температуры плавления порошковой смеси / С.В. Дедков, **В.В. Иванайский**, Р.К. Ахмедзянов,

М.А. Нейман. – № 4323423 / 29-95; заявл. 30.10.87; опубл. 30.10.90, Бюл. № 40.

2. А.с. 1427716. СССР. Способ контроля плавления металла / А.А. Боль, **В.В. Иванайский**, С.П. Лесков, В.В. Тельпиш. – № 4110257; МПК В23К 13/00, 13-02.

3. А.с. 1520996. СССР. Состав для термоиндуктора / В.Я. Тельпиш, А.А. Боль, **В.В. Иванайский**. – № 43882; МПК С-С-01 К 11/12.

4. А.с. 1403760. СССР. Состав термоиндикатора плавления / А.А. Боль, В.В. Иванайский, В.В. Тельпиш, А.М. Царегородцева. – № 4112069/30-10; МПК ЧС-К 11/06

5. А.с. 1664488. СССР. Способ индукционной наплавки / А.А. Боль, С.П. Лесков, **В.В. Иванайский**. – № 4671521/27; заявл. 30.04.89; опубл. 23.07.91, Бюл. № 27.

6. Пат. 2383109. Рос. Фед. МПК H05B 6/36 В23К/3/01. Индуктор для наплавки и закалки деталей / А.Ю. Балаганский, **В.В. Иванайский**, Н.Т. Кривочуров, М.В. Бедарев; заявл. 10.03.2009; опубл. 27.02.2010, Бюл. № 6.

7. Пат. 2366139. Рос. Фед. МПК LO1B35/20; ВА 01 В 15/14 Плоскорежущий рабочий орган / Н.Т. Кривочуров, Е.Н. Бехтер, **В.В. Иванайский**, А.С. Шайхудинов; заявл. 10.03.2008; опубл. 10.09.2009, Бюл. № 25.

8. Пат. 2335752. Рос. Фед. G01M15/0, G093/14. Абразивная имитационная масса для испытания рабочих органов и способ ее получения / **В.В. Иванайский**, Н.Т. Кривочуров, А.А. Иванайский; заявл. 19.04.2007; опубл. 10.10.2008, Бюл. № 28.

9. Пат. 2397849 МПК В23К 13/01; A01B 15/04. Способ изготовления почвообрабатывающей лапы (варианты) / **В.В. Иванайский**, Н.Т. Кривочуров, А.С. Шайхудинов, А.Ю. Балаганский, М.В. Бедарев; заявл. 23.03.2009; опубл. 27.08.2010, Бюл. № 24.

10. Пат. 2338625. Рос. Фед. МПК В22Д/9/00, В23К13/01, В23Н9/00. Способ наплавки стальной детали / **В.В. Иванайский**, Н.Т. Кривочуров, Е.А. Иванайский, А.В. Коваль; заявл. 27.02.2007; опубл. 20.11.2008, Бюл. № 32.

11. Пат. 2379109. Рос. Фед. МПК В02С 13/28. Молоток пластинчатый для кормодробилки / М.Г. Желтунов, **В.В. Иванайский**, Н.Т. Кривочуров, А.В. Коваль; заявл. 17.09.2008; опубл. 20.01.2010, Бюл. № 2.

12. Пат. 2361708. Рос. Фед. МПК В23/00, В28В 7/100 С23Е 4/00. Способ зачистки поверхности от ржавчины / **В.В. Иванайский**, Н.Т. Кривочуров, Е.А. Иванайский, А.В. Коваль; заявл. 03.12.2007; опубл. 20.07.2009, Бюл. № 20.

13. Пат. 236111. Рос. Фед. МПК В23/00, В08В 7/00 С23Е 4/00. Шихта для термитной зачистки от ржавчины / **В.В. Иванайский**, Н.Т. Кривочуров, Е.А. Иванайский, заявл. 03.12.2007; опубл. 20.07.2009, Бюл. № 20.

14. Пат. 2328720. Рос. Фед. МПК G01N 3/56. Машина для испытания на абразивное изнашивание / **В.В. Иванайский**, Н.Т. Кривочуров; заявл. 28.11.2006; опубл. 10.07.2008, Бюл. № 19.

15. Полож. реш. на выдачу пат. № 2010113662/28(019252). Способ термоиндикации / А.В. Ишков, **В.В. Иванайский**, Н.Т. Кривочуров, М.Г. Желтунов, К.В. Селиверстов.

Другие публикации

1. Боль И.А. Индукционная наплавка, технология, материалы, оборудование / А.А. Боль, **В.В. Иванайский**, С.Л. Лесков, В.П. Тимошенко; под общ. ред. А.А. Боля. – Барнаул: Изд-во Алтайского краевого научно-технического общества машиностроителей, 1991. – 147 с.

2. Иванайский В.В. Способ непрерывного плавления компонентов флюса / **В.В. Иванайский**, С.В. Дедков // Сборник статей. – Барнаул: Изд-во НПО АНИТИМ, 1991. – С. 228-333.

3. Ахмедзянов Р.К. Определение удельной теплоты дисперсных материалов / Р.К. Ахмедзянов, **В.В. Иванайский** // Сборник статей. – Барнаул: Изд-во НПО АНИТИМ, 1991. – С. 333-335.

4. Иванайский В.В. Упрочнение деталей сельхозмашин и тракторов методом индукционной наплавки. Обзор / **В.В. Иванайский**, Р.К. Ахмедзянов. – М.: ЦНИИТЭИтракторосельхозмаш, 1989. – С. 44. (Сер. 3. Технология и автоматизация производства (Вып. 6).

5. Иванайский В.В. Совместная индукционно-дуговая наплавка рабочих органов сельхозмашин / **В.В. Иванайский**, Н.Г. Кривочуров, А.С. Шайхудинов, А.В. Ишков // Ползуновский альманах. – 2010. – № 1. – С. 38.

6. Мишустин Н.М. Получение боридных покрытий на высокоуглеродистых легированных сталях при ТВЧ-нагреве / Н.М. Мишустин, **В.В. Иванайский**, Н.Т. Кривочуров, А.В. Ишков // Ползуновский альманах. – 2010. – № 1. – С. 139-142.

7. Мишустин Н.М. Структура и некоторые свойства боридных покрытий для почвообрабатывающих органов / Н.М. Мишустин, **В.В. Иванайский**, Н.Т. Кривочуров, А.В. Ишков // Ползуновский альманах. – 2010. – №1. – С. 43-46.

8. Мишустин Н.М. Конструирование упрочняющего покрытия с учетом реального износа детали / Н.М. Мишустин, **В.В. Иванайский**, Н.Г. Кривочуров, А.В. Ишков // Ползуновский альманах. – 2010. – № 1. – С. 75-79.

9. Боль А.А. Методика определения химического состава флюса для индукционной наплавки / А.А. Боль, **В.В. Иванайский**, С.П. Лесков // Экспресс-информация. – М.: ЦНИТЭИ тракторсельхозмаш, 1988. – С. 7-10.

10. Балаганский А.Ю. Односторонняя индукционная наплавка крупногабаритных деталей / А.Ю. Балаганский, **В.В. Иванайский** // Сборник статей НПО АНИТИМ. – Барнаул, 1991. – С. 221-223.

11. Тимошенко В.П. Инновационная технология индукционной наплавки рабочих органов почвообрабатывающих машин на примере полевой доски пропашных плугов / В.П. Тимошенко, **В.В. Иванайский**, А.А. Русаков // Ползуновский альманах. – 2011. – № 4. – С. 51-55.

Подписано в печать 22.08.2011 г. Формат 60х84/16.
Бумага для множительных аппаратов.
Печать ризографная. Гарнитура «Times New Roman».
Усл. печ. л. 2,0. Тираж 100 экз. Заказ № .

Издательство АГАУ
656049, г. Барнаул, пр. Красноармейский, 98
62-84-26