

На правах рукописи

Юдников Александр Сергеевич

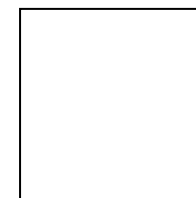
**СКОРОСТНОЕ ЭЛЕКТРОДУГОВОЕ УПРОЧНЕНИЕ
БОРОНИТРОАЛИТИРОВАНИЕМ ДЕТАЛЕЙ
ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН**

**Специальность 05.20.03 – «Технологии и средства
технического обслуживания
в сельском хозяйстве»**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Москва - 2009



- борирования и экзотермического металлоплакирования для упрочнение деталей», М., «Ремонт, восстановление, модернизация» №2, 2007.
5. Ю.Л.Рыжих, В.В.Коршунов, А.С.Юдников, В.Н.Саковцева. «Методы скоростной электродуговой цементации и экзотермического металлоплакирования, при упрочнении и восстановлении деталей», М., «Ремонт, восстановление, модернизация» №2., 2008.
 6. А.С. Юдников, «Скоростное электродуговое борирование эффективный метод упрочнения деталей машин», М., «МТС», ГОСНИТИ, 2008.
 7. А.С.Юдников, Ю.Л.Рыжих. «Аппарат для электродугового упрочнения», Техника в сельском хозяйстве №3, 2008.
 8. А.С.Юдников «Скоростное электродуговое борирование – эффективный метод упрочнения деталей машин», Научно-технический сборник №14, ВТУ, г.Балашиха, 2008.
 9. А.С.Юдников, Ю.Л.Рыжих. «Эффективное упрочнение деталей почвообрабатывающей техники – актуальная проблема в сельском хозяйстве», М., «Труды ГОСНИТИ» том 102., 12.08.2008.
 10. Соловьев Р.Ю., Литовченко Н.Н., Юдников А.С., Рыжих Ю.Л. «Дипольярный графитовый электрод для металлоплакирования и упрочнения» Заявка на изобретение № 037718 от 18.09.2007.
 11. Р.Ю.Соловьев, А.С.Юдников, Ю.Л.Рыжих, В.И.Денисов, «Электродуговой способ упрочнения металлокерамическими покрытиями», Заявка на изобретение №2009110351/20 (014058) от 24.03.2009.

Работа выполнена в Государственном научном учреждении
«Всероссийский научно-исследовательский технологический институт
ремонта и эксплуатации машино-тракторного парка» (ГНУ ГОСНИТИ)

Научный руководитель: кандидат технических наук
Литовченко Николай Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Юдин Владимир Михайлович
доктор технических наук, доцент
Кравченко Игорь Николаевич

Ведущая организация: Федеральное государственное образовательное
учреждение профессионального образования «Московский
государственный агроинженерный университет имени В.П.Горячкина»

Защита диссертации состоится

04 февраля 2010 г. в 14.00 часов на заседании

диссертационного совета «Всероссийского научно-исследовательского
технологического института ремонта и эксплуатации машино-
тракторного парка» (ГНУ ГОСНИТИ)

по адресу: 109428, г.Москва, 1-й Институтский проезд, д.1,
малый зал, этаж 3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГНУ ГОСНИТИ

Автореферат разослан: _____ декабря 2009 г. и размещен на сайте ГНУ
ГОСНИТИ www.gosniti.ru _____ декабря 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

кандидат технических наук, доцент

Р.Ю.Соловьев

легко штампуемую, например ст.45, доводя методом ЭДУ их
твердость до 940-920 кгс/мм² (67 - 68 HRC).

6. Получена высокая односторонняя твердость упрочненного слоя
(67-68 HRC), что обеспечивает самозатачивание рабочего лезвия
рабочих органов сельскохозяйственных машин.
7. По своим возможностям практического использования в
направлении получения различных термодиффузионных
структур упрочненного металла при высокой
производительности процесса, равных ЭДУ в настоящее время
нет.
8. Сравнительные стендовые испытания образцов, упрочненных
бороалитированием показали, что износ ниже закаленных в 4-5
раз.
9. Разработан технологический процесс упрочнения стрелчатых
лап культиваторов, дисков борон и лемехов методом бороалитро-
алитирования. Определены оптимальные режимы упрочнения:
ток, скорость процесса.
Рассчитана годовая экономическая эффективность от
использования технологии ЭДУ и одного комплекта
оборудования на участке составляет при упрочнении лап
культиватора – 558 тыс. руб. дисков барон – 4224 тыс.руб.
10. Разработана компьютерная программа оптимизации
технологического электротермодиффузионного процесса
упрочнения деталей почвообрабатывающей техники.
11. Проведены сравнительные испытания упрочненных ЭДУ лап
культиваторов и других деталей на четырех предприятиях (см.
стр.21).

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах.

1. Ю.Л.Рыжих, А.С.Юдников. «Электродуговое скоростное
упрочнение деталей землеобрабатывающей техники», М.,
«МТС», РИО ГОСНИТИ., 09.2006.
2. Н.Н.Литовченко, А.С.Юдников, Ю.Л.Рыжих. «Метод скоростной
электродуговой цементации деталей, работающих в условиях
абразивного износа», М., «Труды ГОСНИТИ» том 98., 2006.
3. Ю.Л.Рыжих, А.С.Юдников. «Метод скоростной электродуговой
цементации деталей», М. «Техника в сельском хозяйстве», №1,
2007.
4. Ю.Л.Рыжих, В.В.Коршунов, А.С.Юдников, О.А.Пикало,
В.Н.Саковцева. «Методы скоростного электродугового

бороны В2-2-650 с учетом полученного экспериментально показателя увеличения в 3 раза ресурса лап культиваторов и образцов из ст.65Г по абразивной износостойкости в сравнении с заводской технологией закалки.

Годовой экономический эффект от упрочнения программы деталей 4224 лап культиваторов составляет 558 тыс. руб., 2712 дисков борон – 4176 тыс.руб.

При расчете экономической эффективности не учтены потери связанные с регулярной заточкой (один раз в 2 смены) только закаленных лап культиваторов и через 3-4 смены дисков борон.

Детали, упрочненные методом ЭДУ обладают свойством самозатачивания.

Основные выводы.

1. Анализ литературных источников и информации с с/х предприятий показал, что известные термодиффузионные методы упрочнения (цементация, нитроцементация, азотирование и борирование) сложны, энергоемки, непроизводительны, применяются только в заводских условиях с использованием специального оборудования, глубина упрочнения низкая (азотирование 0,6 мм в течение 40 часов, борирование 0,2 - 0,5 мм в течение 4-5 часов.
2. Подтверждается возможность использования высокотемпературных условий создаваемых электрической дугой и графитовыми электродами для термодиссоциации боросодержащих веществ и термодиффузии свободных элементов с образованием боридов FeB и FeB₂ и карбонитридных включений Fe₂ (N, C) и Fe₃ (N, C) и также корунда Al₂O₃, что обеспечивает высокую твердость упрочненных поверхностей деталей.
3. Разработанный новый метод скоростного электротермодиффузионного боронитроалитирования обеспечивает повышение скорости процесса на порядок выше применяющегося в производстве, глубину упрочнения 1,9-2,0 мм, что в 3 раза и больше традиционных методов.
4. Значительно повышена методом ЭДУ микротвердость до 1055 кгс/мм² стали 65Г, недостижимой закалочными способами и наплавкой, например сорматом и другими экономически приемлемыми твердосплавными материалами.
5. ЭДУ дает возможность использовать для изготовления деталей почвообрабатывающей техники взамен ст.65Г более дешевую и

Общая характеристика работы

Актуальность

Износостойкость деталей почвообрабатывающей с/х техники отечественного производства из-за низкой твердости 45 – 48 HRC после термообработки, например, дисков барон из ст.65Г не обеспечивается их достаточный ресурс. Объемная закалка или ТВЧ не обеспечивают самозатачивание лезвия деталей.

Поэтому научно-практическое решение этих проблем является чрезвычайно **актуальным**.

Цель работы

Исследование и разработка нового метода электродугового боронитроалитирования для упрочнения деталей почвообрабатывающих сельскохозяйственных машин, обеспечивающего повышение ресурса в несколько раз по сравнению с новыми и их самозатачивание в процессе работы.

Объектами исследования являются основные рабочие органы почвообрабатывающих машин – лемех плуга, диск бароны и лапа культиватора.

Научная новизна

Научная новизна состоит:

- в использовании тепла прямой и косвенной электрической дуги, графитовых электродов и специальных паст для обеспечения скоростного электротермодиффузионного процесса боронитроалитирования (ЭДУ);
- в разработке и использовании паст, содержащих упрочняющие элементы (бор, азот, алюминий), образующие структурные эвтектические соединения твердых растворов, например цементита Fe₃C, нитридов Fe₃N, Fe₄N, а также боридов FeB, FeB₂ и корунда Al₂O₃ обладающих высокой твердостью. Расплавленный поверхностный слой детали глубиной 1,8 – 2,0 мм является матрицей, придающей стойкость упрочняющему слою против динамических нагрузок и высокую износостойкость, что подтверждено результатами исследования и производственными испытаниями упрочненных методом ЭДУ лап культиваторов.

На защиту выносятся:

- результаты теоретического исследования электротермодиссационных и диффузионных процессов при расплавлении паст, являющихся основой упрочнения;

- результаты экспериментальных исследований функциональной зависимости твердости и глубины упрочнения от величины тока и скорости процесса (производительности упрочнения);
- результаты микроструктурных исследований упрочненного слоя;
- оптимизация процесса ЭДУ и технологический процесс.

Практическая значимость работы состоит:

в разработке нового технологического процесса скоростного электротермомодиффузионного боронитроалитирования рабочих органов сельскохозяйственных машин, который повышает скорость упрочнения и обеспечивает глубину упрочнения 1,8 – 2,0 мм, что в 3 раза больше традиционного метода борирования, обладая твердостью 70-80 HRC.

Рабочая научная гипотеза

Выдвинутая рабочая научная гипотеза заключается в образовании при ЭДУ сверхтвердых компонентов – карбида бора B_4C , нитрида бора BN и корунда Al_2O_3 при расплавлении буры, борной кислоты, карбомида NH_2CONH_2 , криолита Na_3AlF_6 электрической дугой с использованием графитового электрода.

Квалифицированные исследования могут привести к получению высокоизносостойких упрочняющих покрытий, обеспечивающих ресурсную равнопрочность рабочих органов с техникой в целом.

Апробация

Производственная апробация метода ЭДУ произведена на 5-ти предприятиях, включая сельскохозяйственные производственные испытания (стр.21).

Выступление на международной научно-технической конференции «Научные проблемы развития ремонта, технического обслуживания машин, восстановления и упрочнения деталей» 11 декабря 2007г. с докладом «Скоростное электродуговое борирование – эффективный метод упрочнения деталей машин».

Публикации

По теме диссертации опубликовано 9 работ, поданы 2 заявки на изобретение.

Содержание работы

В **первой главе** исследовано состояние вопроса и определены задачи исследования.

Наиболее существенный вклад в изучении работоспособности и износостойкости рабочих органов почвообрабатывающей техники, а также методов и технологий упрочнения внесли следующие

бетоносмесителей, подверженных интенсивному абразивному износу, производственные простои техники сократились на 80%, вследствие повышения ресурса в 2 раза по сравнению с новыми.

Оптимизация процесса ЭДУ.

Экспериментальные исследования показали, что критерии оптимизации зависят также от состава паст и материала подложки, что отражено в таблицах.

Переменными функциями приняты: величина тока (I) и скорость упрочнения (S). Математическую задачу оптимизации можно выразить следующими целевыми функциями: $H_{\mu} = f_1(I) \rightarrow \max$; $H_{\mu} = f_2(S) \rightarrow \max$.

Математическая модель оптимизации определена, используя полученные экспериментальные данные и построенные соответствующие графики, на основании которых подобрано для функций $H_{\mu} = f(I, S)$, $h = f(I, S)$ эмпирические выражения, приблизительно изображающие в ней эти функции.

Простейшая эмпирическая формула – квадратичный трехчлен является наиболее близким типом эмпирической формулы к нашим зависимостям ($y = ax^2 + bx + c$). Задача состоит в определении параметров a , b , c используя метод средних.

Компьютерная программа оптимизации процесса электротермомодиффузионного процесса представляет собой скомпилированный exe файл, а также прилагаемые к нему исходный код на языке C# с использованием библиотеки Windows Forms. Программа может быть запущена в любой операционной системе Microsoft Windows с установленным пакетом .Net Framework.

Программа обрабатывает входные данные, которые получены в ходе проведенных экспериментов и оформлены в виде таблиц. Результатом обработки являются расчетные значения оптимальных технологических параметров нанесения покрытий, то есть программа определяет режимы для достижения максимальных значений заданных технологических показателей твердости (H_{μ}) и глубины упрочнения (h).

В результате оптимальными режимами упрочнения пастой №6 определенные компьютерной программой $I = 103A$, $S = 173$ мм/мин.

Экономическая эффективность от использования метода ЭДУ боронитроалитированием.

Расчет выполнен на примере использования одного комплекта оборудования для ЭДУ лап культиваторов «ПАУК – 3,6» и дисков

Закален- ная сталь								167		
-----------------------	--	--	--	--	--	--	--	-----	--	--

Износостойкость упрочненной поверхности бороалитированием в 4-5 раз выше закаленных сталей (ст.40 и ст.65Г) комбинированная диффузия бора с алюминием обеспечивает наибольшую износостойкость среди других многокомпонентных упрочняющих покрытий.

Реализация результатов исследований

Результаты теоретических и экспериментальных исследований могут быть использованы на машиностроительных предприятиях, выпускающих почвообрабатывающую, перерабатывающую, добывающую, строительную и другую технику, к деталям которой предъявляются высокие противоизносные требования из-за абразивной среды их работы, а также результаты могут быть использованы в условиях эксплуатации этой техники.

Производственные испытания технологии ЭДУ.

1. ОАО «Ежовское» Волгоградская обл. Испытание лап культиваторов КПЭ – 3,8. Внедрена технология и оборудование ЭДУ. Время между очередными заточками увеличилось примерно в 5 раз. Ресурс упрочненных лап увеличился по сравнению с новыми в 3-4 раза.
 2. ООО «Сельмаш» г.Сызрань. Ресурсные испытания лап культиваторов ОПО 4.25 упрочненных методом ЭДУ. Упрочнение лап культиватора методом ЭДУ дает положительные результаты, выражающиеся в увеличении ресурса работы ориентировочно в 2,5 – 3 раза по сравнению с ресурсом новых лап с обычной закалкой.
 3. ЗАО «Холдинговая компания «Ополье», г.Владимир. Проведены испытания упрочненных ножей молотковой комбикормовой мельницы. В работе ножи подвергнуты интенсивному абразивному износу. Ресурс упрочненных ножей методом ЭДУ оказался выше на 30% по сравнению с наплавленными ножами твердыми электродами Т-590 по технологии завода.
- Дополнительная производственная апробация.**
4. Московский коксогазовый завод. Производственные испытания с 2008 года тормозных барабанов крана. Результаты положительные. Испытания продолжаются.
 5. ОАО «345 механический завод» (г.Москва). Результат упрочнения быстроизнашивающихся рабочих лопаток

отечественные и зарубежные ученые: Андропов В.И., Бернштейн Д.Б., Бойков В.М., Бурченко П.М., Винокуров В.М., Виноградов В.Н., Горячкин В.П., Голубев И.Г., Джонстон Р., Ермолов Л.С., Ерохин М.Н., Краснощеков Н.В., Крагельский И.В., Костецкий Б.И., Лялякин В.П., Михальченко А.М., Ниловский И.Л., Панов И.М., Пронин А.Ф., Рабинович А.Ш., Розенбаум А.Н., Севернев М.М., Сидоров С.А., Синсоков Г.Н., Тененбаум М.М., Черноиванов В.И., Хрущев М.М. и многие другие ученые.

В России особо остро стоит проблема повышения ресурса рабочих органов почвообрабатывающей техники, так как ни один из предложенных в настоящее время методов не решает эту задачу на требуемом уровне, что приводит к огромным финансовым и трудовым потерям в сфере производства и эксплуатации с/х техники.

На практике используются для упрочнения наплавочные процессы плазмой, ТВЧ и электродуговой наплавкой порошковыми проволоками типа ППАН103 и др. В России, Европе и США используются порошки твердых сплавов ПТС-УС-25, ФБх6-2, а также порошковые твердые сплавы, содержащие карбид хрома, борид хрома, карбид бора и карбид вольфрама. Но такие порошки дорогие, поднимающие цену наплавленных (1-1,3мм толщина слоя) ими деталей на 20%.

На отечественных заводах – изготовителях рабочие органы почвообрабатывающей техники, например, ЗАО «Рубцовский завод запасных частей», ООО «Сельмаш» упрочнение выполняют индукционной наплавкой сплавов типа «Сормайт», ПТС-УС25, ФБХ-6-2. Повышение износостойкости по сравнению с серийными деталями в 1,5 – 2,0 раза.

При сравнительной оценке предлагаемый метод ЭДУ значительно превосходит традиционные термодиффузионные методы упрочнения и наплавки по твердости (70-80 НRC) и удорожанию детали упрочнением в 2 раза ниже наплавки. ЭДУ обеспечивает самозаточивание детали.

Задачи исследования

На основании анализа существующих методов упрочнения и поставленной цели работы сформулированы следующие задачи исследования:

1. Термодинамический анализ взаимодействий химических компонентов в расплаве паст для целей разработки их составов.
2. Экспериментальное исследование зависимости критериев оптимизации – твердости и глубины упрочнения от режимов процесса – выбранных управляемых переменных – величины

тока и времени воздействия тепла электрической дуги на упрочняемый металл.

3. Исследование сравнительной износостойкости упрочненных поверхностей образцов различных сталей и микроструктурный анализ упрочненного слоя.
4. Оптимизация электротермодиффузионного упрочнения деталей почвообрабатывающей техники с разработкой математической модели процесса и компьютерной программы.

Во второй главе представлено теоретическое обоснование выбора материала и оптимальных режимов получения упрочненного боридного слоя.

Проверка возможности насыщения железа бором с применением паст представляет интерес с точки зрения изучения механизма диффузионного образования борированного слоя. Будучи тугоплавким (2075°C) бор образует с железом относительно легкоплавкую эвтектику с температурой плавления 1174°C , состоящую из α -фазы и боридов Fe_2B .

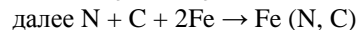
В качестве активного наполнителя пасты предложено использовать буру ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$), карбид бора (B_4C) и другие боросодержащие соединения.

Экспериментально определено, что характер образования боридных слоев в сильной степени зависит от температурного режима обработки. При высокотемпературном насыщении формирование борированного слоя происходит в основном за счет диффузии в жидкой фазе.

Метод ЭДУ является многокомпонентным термодиффузионным процессом упрочнения стали, так как одновременно в нем могут участвовать углерод, бор, азот, алюминий, кремний и другие элементы.

При ЭДУ возможен процесс нитроцементации с образованием в поверхностном слое карбонитридных включений $\text{Fe}_2(\text{N},\text{C})$ и $\text{Fe}_3(\text{N},\text{C})$, которые обеспечивают более высокую износостойкость упрочненных деталей, чем после цементации.

В процессе ЭДУ нитроцементация происходит по следующей схеме:



Термодинамический анализ взаимодействия химических компонентов в расплаве паст

На основании термодинамического анализа возможных взаимодействий в расплаве, используя термодинамические данные и

Удельная нагрузка на площадь поверхности абразивного порошка, в котором располагается вал с испытываемыми образцами – $0,02 \text{ МПа}$.
Время испытания одновременно нескольких образцов – 3 часа.

Абразивным материалом служит кварцевый песок марки $2\text{K}_1\text{O}_3\text{O}_{25}$, ГОСТ 2138 с размером частиц $0,25-0,3 \text{ мм}$. Износостойкость оценивалась по удельному линейному износу образца ($I_{\text{уд}}$) в мкм/г .

Основными критериями предельного состояния при полевых сравнительных испытаниях, например, лап культиваторов, принимались износ носка на 30 мм , износ лезвия по ширине на 15 мм , неравномерное изнашивание лезвия лапы и зависание сорняков на крыльях.

Результат измерений сравнительной износостойкости представлены в таблице №9.

Сравнительная износостойкость многокомпонентных диффузионных покрытий при испытаниях в условиях абразивного износа.

Таблица №9

Вид диффузионного насыщения	Состав активной пасты	Глубина упрочнения стали, мкм			Микротвердость упрочненного слоя (H_{μ}), кгс/мм ²			Удельный линейный износ, мкм/час		
		65Г	40	30	65Г	40	30	65Г	40	30
Бороалитирование	$\text{H}_2\text{B}_4\text{O}_7 + \text{BC}_4 + \text{Al} + \text{Na}_2\text{CO}_3$ (паста №1)		1,79			768			41	
Борирование	$\text{H}_2\text{B}_4\text{O}_7 + \text{C} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Na}_2\text{CO}_3$ (паста №2)			2,23			565			55
Борирование	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 + \text{BC}_4 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{NaNO}_3$ (паста №7)			2,94			618			52
Бороалитирование	$\text{H}_2\text{B}_4\text{O}_7 + \text{BC}_4 + \text{Na}_3\text{AlF}_6 + \text{NaF} + \text{NaNO}_3$ (паста №6)	1,98	1,93	1,98	1055	795	768	32	38	42

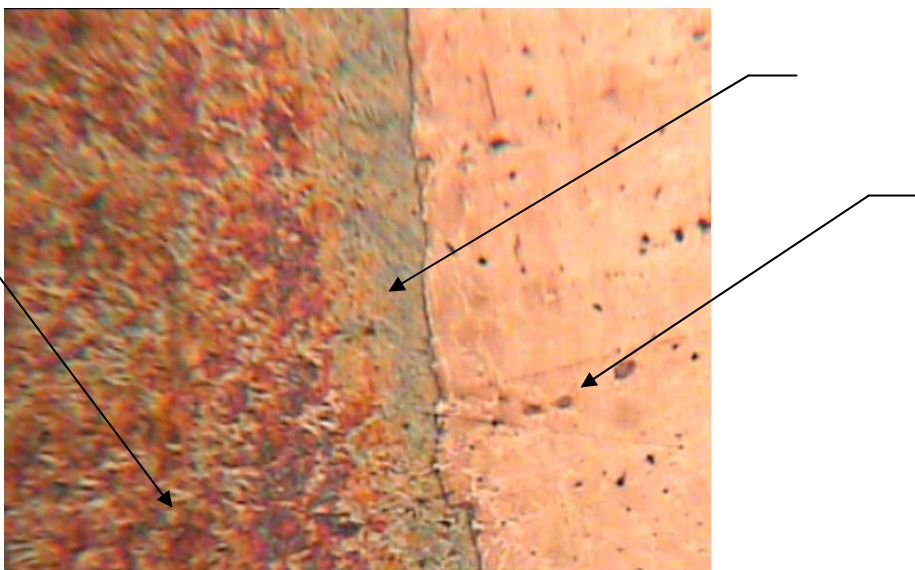


Рис. 9 Снимок микроструктуры при 500х увеличении ст.40, упрочненной пастой №1; 1-упрочненный слой; 2-подложка; 3-переходная зона.

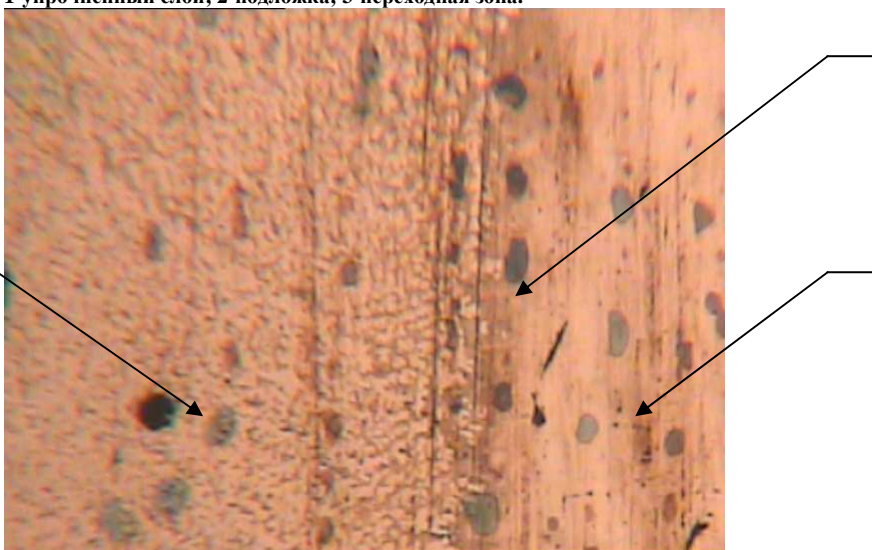


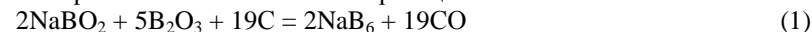
Рис. 10 Снимок микроструктуры при 500х увеличении ст.30, упрочненной пастой №6; 1-упрочненный слой; 2-подложка; 3-переходная зона.

дополнительные данные о составе полученных продуктах реакции можно составить наиболее вероятный характер протекания процесса ЭДУ.

При нагревании буры образуется соединение NaBO_2 , что соответствует изобарно-изотермическому потенциалу реакции:



В расплаве пасты возможны реакции:



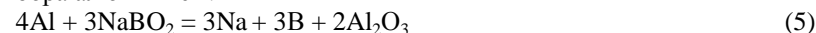
при которых образуется неустойчивое соединение NaB_6 , разлагающееся на элементарный бор и натрий:



Полученный по (3) натрий восстанавливает B_2O_3 по реакции (4)

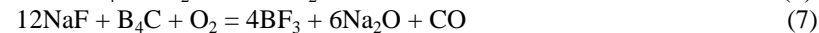


При этой реакции, как и при распаде буры, образуется новое количество устойчивого соединения NaBO_2 , которое или взаимодействует по реакциям (1) и (2), или редуцируется до натрия и бора алюминием:

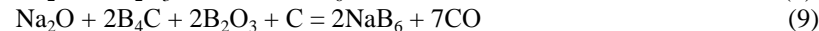


При отсутствии атомов алюминия активность процесса насыщения бором уменьшается.

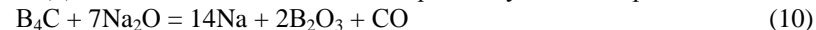
На поверхности расплавленной пасты в присутствии кислорода происходят следующие реакции, в которых принимает участие и NaF :



Na_2O реагирует с B_2O_3 , B_4C и C , образуя новое количество NaB_6 , которое по реакции (3) распадается:

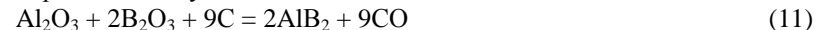


Дополнительное количество натрия получается по реакции:



Отсюда следует вывод, что для образования активных атомов бора в расплаве пасты необходимо либо получение натрия по реакциям (3) и (5), либо окисла натрия Na_2O или неустойчивого соединения NaB_5 .

Образование атомов алюминия из его оксида проходит через образование неустойчивого соединения AlB_2 :



Часть образовавшегося алюминия диффундирует в сталь, другая часть участвует в реакциях (5) и (14), что повышает количество бора и толщину диффузионного слоя:



Таким образом, в пасте, состоящей из борного ангидрида, окиси алюминия и углерода (без карбида бора) происходит совместное бороалитирование.

Применяемый в бороалитирующих пастах криолит устойчив в температурном интервале 273 – 1323 К:



Термодинамическая возможность реакции (16) и (18) показывает, что борированию и бороалитированию можно подвергать окисленные поверхности:



Третья глава содержит

Металлографические исследования выполнялись на поперечных шлифах с помощью электронного микроскопа МИМ – 8М и микротвердомере ПМТ – 3. Уколы наносили при нагрузке 0,981Н в виде дорожек. Увеличение при 500х и 1000х. Травление шлифов выполнено в 5% растворе азотной кислоты в течении 30 сек.

Оборудование для ЭДУ.

В промышленности для термодиффузионного упрочнения используется сложное, энергоемкое оборудование. Процессы упрочнения занимают часы.

На практике требуется выполнить упрочнение не только на заводах-изготовителях с/х техники, но и в условиях мастерских, фермерских хозяйств и других сельскохозяйственных предприятий, РТП, МТС.

Поэтому для устранения пробела в сфере применения термодиффузионных упрочняющих технологий потребовалось разработать и исследовать новый метод скоростного электродугового упрочнения (ЭДУ), который отвечал бы выдвинутым требованиям. Кроме мобильности он обладает простотой в использовании, не энергоемкий и производительный.

ЭДУ основан на использовании тепловой энергии электрической прямой и косвенной дуги и графитовых электродов.

Наши исследования направлены на совершенствование метода ЭДУ, заключающегося на использовании прямой и косвенной дуги и легирующих паст, что отличает наш вариант метода от предложенного Андроповым В.И. Электрическая дуга стабильна, обеспечивает расплавление пасты и диффузионное упрочнение на глубину до 2-2,5 мм.

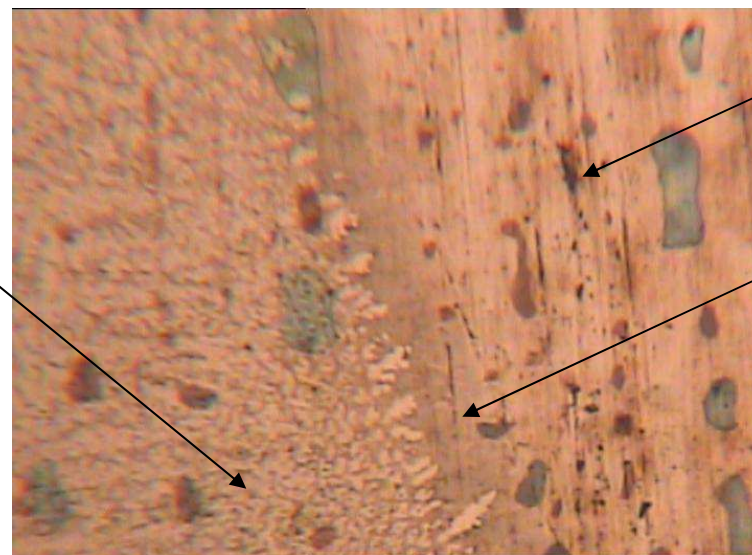


Рис. 7 Снимок микроструктуры при 500х увеличении ст.65Г, образец 246, упрочнение пастой №6; 1-упрочненный слой; 2-подложка; 3-переходная зона.

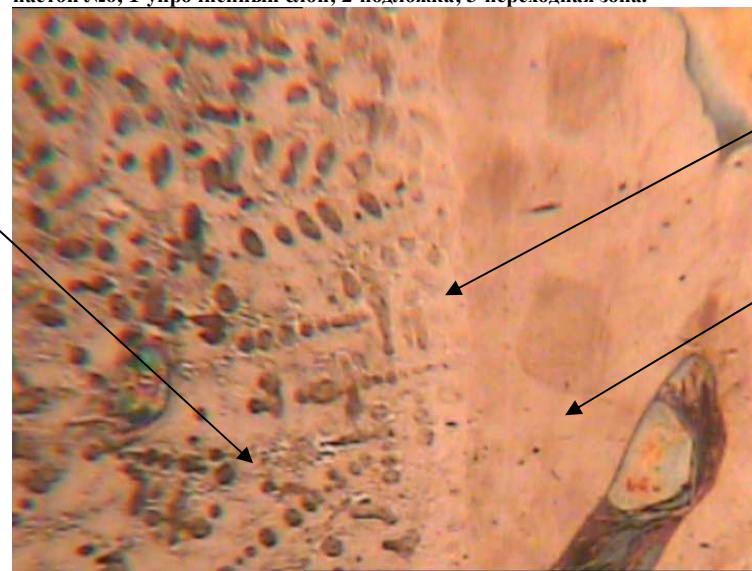


Рис. 8 Снимок микроструктуры при 1000х увеличении ст.40, упрочненной пастой №6; 1-упрочненный слой; 2-подложка; 3-переходная зона.

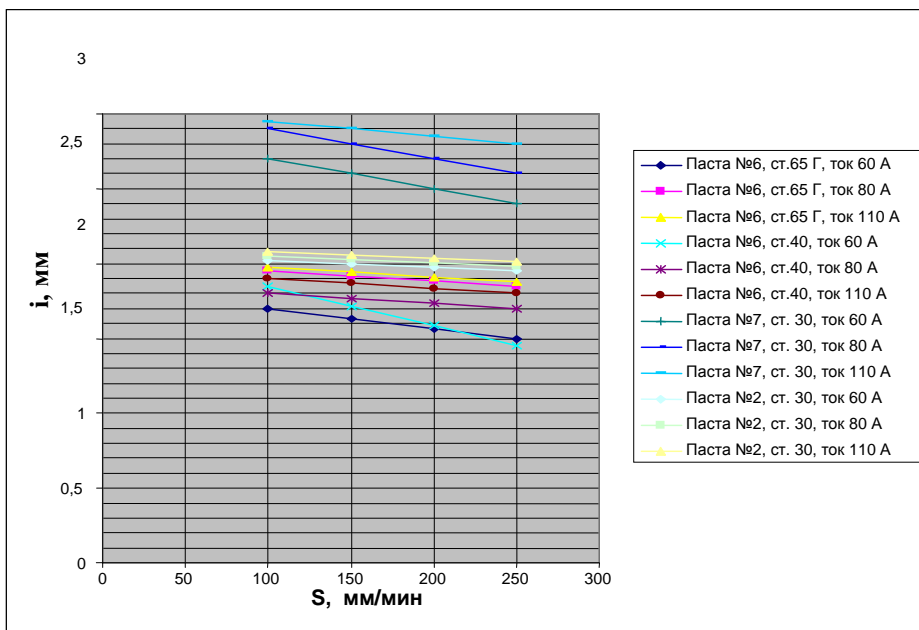


Рис. 6 Зависимость глубины упрочнения (i , мм) от величины тока (I , А) и производительности (S , мм/мин).

Микроструктурный анализ.

Исследованию подвергнуто 10 образцов из сталей: ст.65Г, ст.40, ст.30, упрочненных электротермодиффузионным методом с использованием паст, содержащих бор, алюминий, азот.

На рис.7, 8, 9, 10 представлена микроструктура слоя образца из ст.65Г, ст.40, ст.30 с применением пасты №6, толщина слоя 2,0 мм.

Микроструктура состоит из железной матрицы с интерметалидами и отдельных фаз темно-серого и белого цвета. Эти фазы четко различимы, местами имеют неправильную округлую форму. Расположены эти фазы достаточно близко друг к другу и имеют высокую микротвердость (1225 – 654 кгс/мм²).

Интерметаллидные фазы – это консолидированные соединения карбидов железа, бора, нитридов, образующихся расплавлением пасты совместно с верхним слоем подложки на глубину до 2,0 мм.

Процесс боронитроалитирования значительно производительнее промышленного (1дм² за 6 мин).

Аппарат ЭДУ (рис.1) представляет собой силовой трансформаторный блок, понижающий напряжение 220В до безопасного 60В при обеспечении рабочего тока от 60 до 200А.

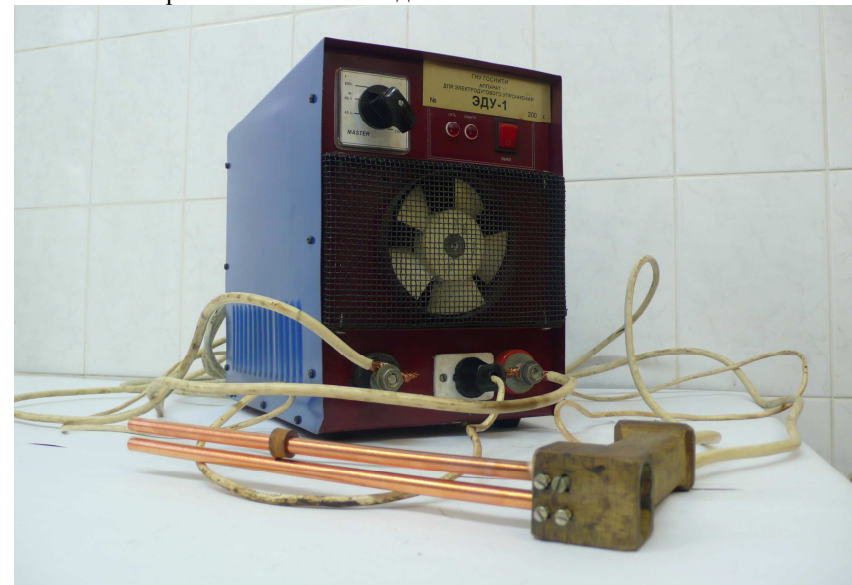


Рис.1 Аппарат ЭДУ

Оборудование для испытания на износостойкость в абразивной среде.

Общий вид установки трения представлен на рис.2. Установка состоит из силового агрегата (электродвигатель переменного тока мощностью – 5 кВт с редуктором, обеспечивающим постоянные 20 об./мин, узла абразивного износа образцов, состоящего из корпуса и вала с образцами и нагрузочной платформы с гирями. Абразивный материал – кварцевый песок, засыпанный в корпус. На него устанавливается нагрузочная платформа.

Вращение вала с образцами, засыпанными кварцевым песком, осуществляется под нагрузкой веса платформы и гирь.

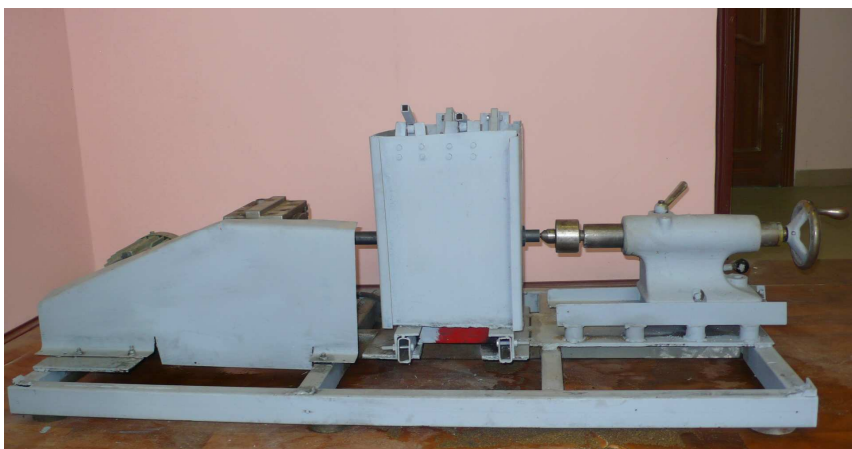


Рис.2 Установка для испытания на износостойкость.

В четвертой главе приведены результаты экспериментального исследования упрочнения деталей методом электродугового боронитроалитирования – функциональной зависимости твердости и глубины упрочнения от токовых режимов, производительности процесса, состава паст и марки стали детали, а также результаты микроструктурного анализа упрочненного слоя, сравнительной износостойкости, оптимизации процесса ЭДУ с разработкой его математической модели и компьютерной программы. Глава 4 завершается технико-экономическим обоснованием с расчетом эффективности, технологическим процессом ЭДУ деталей почвообрабатывающей техники и общими выводами.

Пасты, применяемые в экспериментах по оптимизации процесса упрочнения, состоят из боросодержащих материалов (бура $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ и карбид бора BC_4), а также натрия азотнокислого (NaNO_3), кальцинированной соды (Na_2CO_3), криолита (Na_3AlF_6) и оксида алюминия (Al_2O_3).

Все используемые пасты (их было 4) из разных составляющих химических соединений, и в разных пропорциях. Количественное соотношение компонентов в пасте определялось на основании металлургических особенностей образования твердых растворов и химического расчета термодиссоциации веществ, а также экспериментальной корректировки по полученным результатам микротвердости и глубины диффузии. Основными элементами, влияющими на конечный результат являются бор, азот и алюминий, Na_2CO_3 – стабилизатор горения дуги, NaNO_3 играет двойную роль – как

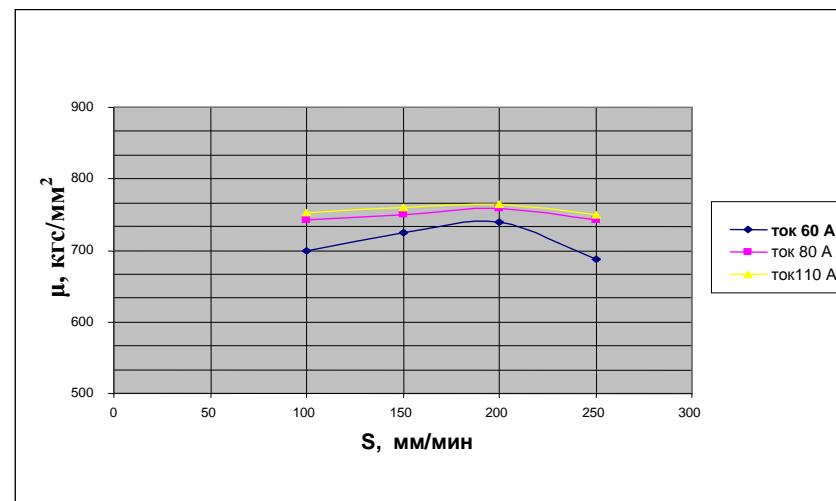


Рис. 4 Зависимость микротвердости (μ , кгс/мм²) упрочненного слоя от величины тока (I) и производительности (S, мм/мин) с использованием пасты №1 на образцах ст.40

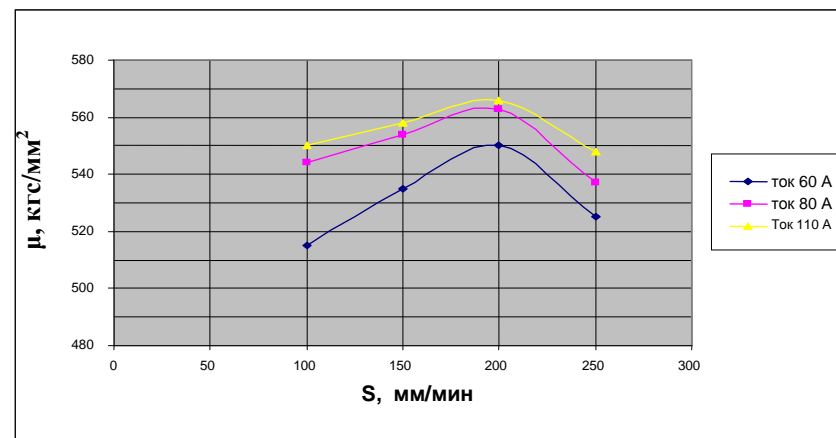


Рис. 5 Зависимость микротвердости (μ , кгс/мм²) упрочненного слоя от величины тока (I) и производительности (S, мм/мин) с использованием пасты №2 на образцах ст.30

При исследовании микроструктуры слоя отмечено, что интерметаллиды и фазы белого цвета достаточно хрупкие. Но жесткие испытания упрочненных образцов в абразивной среде (кварцевый песок) в ГОСНИТИ показали результаты не только высокой сравнительной износостойкости покрытия, но и прочности из-за матрично-армированной структуры FeV.

Графики зависимости микротвердости от тока и производительности упрочнения сталей.

Микротвердость увеличивается с ростом величины тока.

Закономерность: при упрочнении сталей, независимо от содержания углерода в них (ст.30, ст.40, ст.65Г) – микротвердость повышается до скорости упрочнения 200 мм/мин. При дальнейшем её росте микротвердость уменьшается вследствие сокращения времени теплового воздействия дуги в процессе диффузии углерода и легирующих элементов; при более низкой производительности ($S = 100$ мм/мин) заметное снижение микротвердости по сравнению со скоростями 150-200 мм/мин. Это можно объяснить перегревом поверхности металла из-за более длительного воздействия температуры дуги, вызывающего повышенное окисление, увеличивающее пористость.

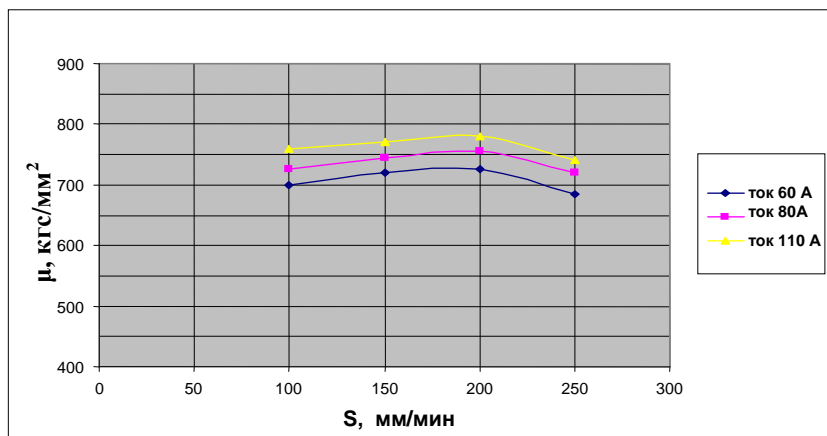


Рис. 3 Зависимость микротвердости (H_{μ} , кгс/мм²) упрочненного слоя от величины тока (I) и производительности (S, мм/мин) с использованием пасты №6 на образцах ст.30

стабилизатор (Na) и армирующего азота (N). Такую же роль играет и Na_3AlF_6 , хотя на алюминий возложена более значительная - упрочняющая функция.

Из всех исследованных паст наиболее высокие и стабильные показатели микротвердости обеспечивает паста №6: среднее ее значение при токе 110 А достигает 1070 кгс/мм² ст.65Г, 803 кгс/мм² ст.40, 769 кгс/мм² ст.30 на глубине упрочнения 1,9 мм.

Примерно такие же результаты получены при использовании пасты №1 – 776кгс/мм², ст.40 (рис.4).

Из полученных данных видно, что микротвердость увеличивается с ростом величины тока. Выявлена закономерность повышения микротвердости до скорости процесса 200 мм/мин, при дальнейшем её росте она уменьшается (рис.5).

Средняя микротвердость на образце №24 (ст.65Г), паста №6 на глубине до 1,98 мм.

Таблица №5

I	Скорость упрочнения (S) мм/мин			
	100	150	200	250
	Микротвердость (H_{μ}) кгс/мм ²			
60	967	1001	1015	976
80	1025	1040	1055	1015
110	1044	1059	1070	1034
Q	4	4	4	4

I – ток, ампер;

q- толщина слоя пасты, мм.

Средняя микротвердость на образце №18 (ст.40), паста №1 на глубине до 1,8 мм

Таблица №6

I	Скорость упрочнения (S) мм/мин			
	100	150	200	250
	Микротвердость (H_{μ}) кгс/мм ²			
60	703	728	739	692
80	745	751	768	739
110	759	770	776	752
Q	4	4	4	4

Средняя микротвердость на образце №74 (ст.30), паста №6 на глубине до 1,98 мм

Таблица №7

I	Скорость упрочнения (S) мм/мин			
	100	150	200	250
	Микротвердость (H_{μ}) кгс/мм ²			

60	696	721	731	703
80	738	748,6	760	731
110	751,6	762	769,6	745
Q	4	4	4	4

Средняя микротвердость на образце №63 (ст.40) паста №6 на глубине до 1,93 мм

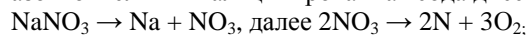
Таблица №8

I	Скорость упрочнения (S) мм/мин			
	100	150	200	250
Микротвердость (H _ц) кгс/мм ²				
60	724	750	761	731,7
80	769	780	792	762
110	783	794	803	775,6
Q	4	4	4	4

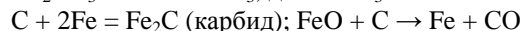
Микротвердость и глубина упрочнения зависят не только от технологических режимов (тока и производительности), но и от материала упрочняемых деталей и состава паст (рис.3, 4, 5).

Чем выше содержание углерода в подложке, тем значительнее микротвердость. Так для стали 65Г среднее значение H_ц колеблется в пределах 967 – 1070, для ст.40 – 724 – 803, для ст.30 – 696 – 768 кгс/мм² при использовании пасты №6, содержащей бор и алюминий.

Под действием высокой температуры электрической дуги натрий азотнокислый и кальцинированная сода диссоциируют:

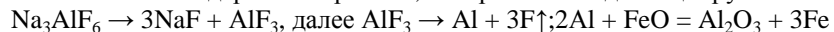


Возможно такая реакция $\text{NO}_3 + 2\text{Al} = \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{N}$; $\text{N} + 3\text{Fe} = \text{Fe}_3\text{N}$ или Fe_4N – нитрид



То есть в присутствии углерода образуются твердые карбонитридные включения в упрочненном слое – Fe₃ (N, C) или Fe₂ (N, C).

В пасте №6 содержится криолит, который также диссоциирует:



Далее под действием высокой температуры электрической дуги Al₂O₃ расплавляясь, превращается в корунд.

Исследование распределения бора и углерода в упрочненном слое проводилось в научно-производственном предприятии «ЭГА» г.Москва по методике вторично-ионной масспектроскопии на магнитной установке с ионным зондом, состоящей из масс-спектрометра МИ-1305 и универсальной приставки, включающей в себя ионную пушку и камеру мишени. Бомбардировка мишени осуществлялась ионами аргона с

энергией 4,5 кВ, диаметр пучка на образце – 1 мм и интенсивность тока – 5 мкА.

Паста №6, ст.40 Образец: №16 время:16:04:51, дата:24.01.2007.

Таблица №2

	Ca	Zn	B1	B2
№16:1	-	0,00165	0,02053	0,01745
№16:2	-	0,00228	0,02105	0,01835
№16:3	-	0,00147	0,02191	0,01950
№16:4	-	0,00195	0,01611	0,01477
№16:5	-	0,00158	0,01446	0,01317
Средн.	-	0,00178	0,01881	0,01665
СКО [%]	-	18	17	15

Паста №7, ст.30 Образец: №130 время:14:09:40, дата:05.02.2007.

Паста №1, ст.40 Образец: №18 время:14:06:36, дата:05.02.2007.

Таблица №3

	C
№130:1	1,640
№130:2	0,9482
№130:3	1,857
№130:4	1,263
№130:5	1,070
№130:6	1,733
№130:7	-
Средн.	1,418
СКО [%]	26

Таблица №4

	C
№18:1	0,9064
№18:2	0,6029
№18:3	0,9585
№18:4	0,6040
№18:5	0,8315
№18:6	0,8910
Средн.	0,79
СКО [%]	27

Оценку хрупкости упрочненного слоя осуществляли с помощью микротвердомера ПМТ-3 по числу и характеру трещин у отпечатка алмазной призмы, вдавливаемой при нагрузке 0.196, 0.49, 0.98 Н в исследуемую поверхность.