

Глава 17. КОМПЛЕКСНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ КОРПУСА ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩЕГО ПЛУГА ПОВЕРХНОСТНЫМ И ОБЪЕМНЫМ УПРОЧНЕНИЕМ БЫСТРОИЗНАШИВАЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ

Константинов В.М., Ткаченко Г.А., Щербаков В.Г.
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь, E-mail: vm.konstantinov@bntu.by

Введение

Обработка почвы – один из самых энерго- и материалоемких процессов деятельности человека. Ежегодное потребление быстроизнашиваемых рабочих органов почвообрабатывающих машин по разным источникам составляет порядка 15 миллионов евро (€). Номинальный пахотный фонд Беларуси составляет около 6 миллионов Га. Основную часть пахотного фонда страны составляют тяжелые супеси (34% от общей площади пахотных земель), легкие суглинки (25%) и средние суглинки (27%) [1]. Супесчаные почвы являются при этом наиболее изнашивающими, их коэффициент изнашивающей способности равен 1,7...2,2. Коэффициент изнашивающей способности легких суглинков составляет 1,4...2,0, для средних суглинков – 0,8...1,6 [1, 2]. Поэтому почвообрабатывающие агрегаты работают в условиях интенсивного абразивного изнашивания. Очевидно, что повышение долговечности этих деталей и агрегатов в целом было актуальным в XX веке, остается актуальным в XXI веке... Интенсификация почвообработки, характерная для мирового сельского хозяйства, еще более активизирует изнашивание. Традиционно, основное внимание уделяется упрочнению наиболее интенсивно изнашиваемых деталей – лемех плуга, долото, лапа культиватора и др. Для этих деталей широко применяются способы объемного и поверхностного упрочнения [3]. В советское время были проведены обширные исследования и осуществлено крупномасштабное промышленное внедрение технологий индукционной наплавки деталей рабочих органов почвообрабатывающих машин [4,5].

В последние десятилетия в странах Евросоюза несколько выросла доля деталей с наплавленными слоями из износостойких сплавов. Популяризации наплавки способствует большая дифференциация слоев лезвия по свойствам и эффективность упрочнения. Все чаще комплектуются наплавленными лемехами продукция крупных европейских производителей, ориентированная на белорусский рынок (Lemken, Rabewerk, Velota и др.). При упрочнении рабочих органов плугов в странах Евросоюза наиболее широко используется электродуговая наплавка, характеризующаяся относительно невысокой производительностью и качеством наплавленного слоя (рис.1). Это объясняется тем фактом, что большинство указных деталей подвергают наплавке в торговых представительствах и технических центрах ведущих плугостроителей в небольших объемах для достижения максимальной адаптации к конкретным агроклиматическим условиям в регионе.



Рисунок 1 – Электродуговая наплавка носка плужного лемеха. Rabewerk
а) – новый; б) – после выработки 15 Га на каменистых почвах

Своеобразный «ренессанс» технологий индукционной наплавки деталей почвообрабатывающей техники в Беларуси в последние десятилетия в значительной степени связан с успехами теории и технологии синтеза доступных диффузионно-легированных (ДЛ) наплавочных порошковых сплавов (научная школа чл. корр. НАН Беларуси Ф.И. Пантелеенко) [6]. В свое время были разработаны дешевые ДЛ-сплавы на базе чугунной стружки для наплавки различных быстроизнашиваемых деталей [7,8]. Рациональные схемы легирования и оптимизация термической обработки позволили достичь высокой абразивной износостойкости наплавки и привлекательных экономических параметров упрочнения лемехов и долотьев отечественного производства [9]. Повышение износостойкости наиболее быстроизнашиваемых деталей почвообрабатывающего агрегата выявило ряд следующих деталей узла, которые имели низкую износостойкость и лимитировали долговечность всего механизма. Речь идет о крепежных болтах плужных долотьев и лемехов а так же полевых досках и отвальных поверхностях.

Многолетний опыт выполненных работ убедительно показал, что для повышения ресурса всего узла почвообрабатывающего агрегата необходимо обеспечивать комплексное, технико-экономически целесообразное упрочнение всех изнашиваемых деталей в соответствии и условиями их работы [10]. Освещению авторского подхода к комплексному повышению ресурса корпуса почвообрабатывающего плуга посвящена эта глава.

1. Системный подход к упрочнению деталей корпуса плуга

Анализ узла (корпус плуга) с системных позиций свидетельствует о наличии классической иерархической многоуровневой системы (рис.2) [10]. Собственно упрочнение быстроизнашиваемых деталей (система 2) определяется надсистемными требованиями к всему агрегату (надсистема 1). Целесообразность упрочнения определяется вкладом детали в обеспечение ресурса всего узла. Его ресурс, как правило, лимитирован долговечностью наименее износостойкой детали – лемех, долото. Повышение ресурса этой детали выводит на роль лимитирующей следующую по долговечности деталь и т.д. Поэтому ошибочно полагать, что повышение долговечности наименее износостойкой детали гарантирует требуемое повышение работоспособности всего корпуса. Обсуждаемый комплексный подход предполагает упрочнение всех изнашиваемых деталей, пропорционально интенсивности их разрушения. Выбор упрочняющей технологии и соответствующих сплавов определяется ведущим механизмом потери работоспособности детали и технико-экономическими параметрами (надсистема 1). Анализируемые детали относительно дешевы. Поэтому, применение дорогостоящих сплавов и технологий может оказаться не эффективным. Многолетний опыт свидетельствует, что свойства ряда традиционных наплавочных сплавов на железной основе (ФБХ-6-2, ПС-5, ПГ С27 и др.) близки, а стоимость может отличаться значительно.

В общем случае, для всех анализируемых деталей характерно локальное абразивное изнашивание различной интенсивности отдельных участков. Важное значение для ряда деталей имеют прочностные характеристики, в том числе ударная вязкость. Теория и технология диффузионного легирования наплавочных сплавов открывает широкие возможности по экономически эффективному синтезу защитных покрытий требуемой структуры и свойств (подсистемы 3,4) [6,10]. Ниже более детально описаны реализованные технологии упрочнения и соответствующие сплавы для обсуждаемых деталей корпуса почвообрабатывающего плуга.

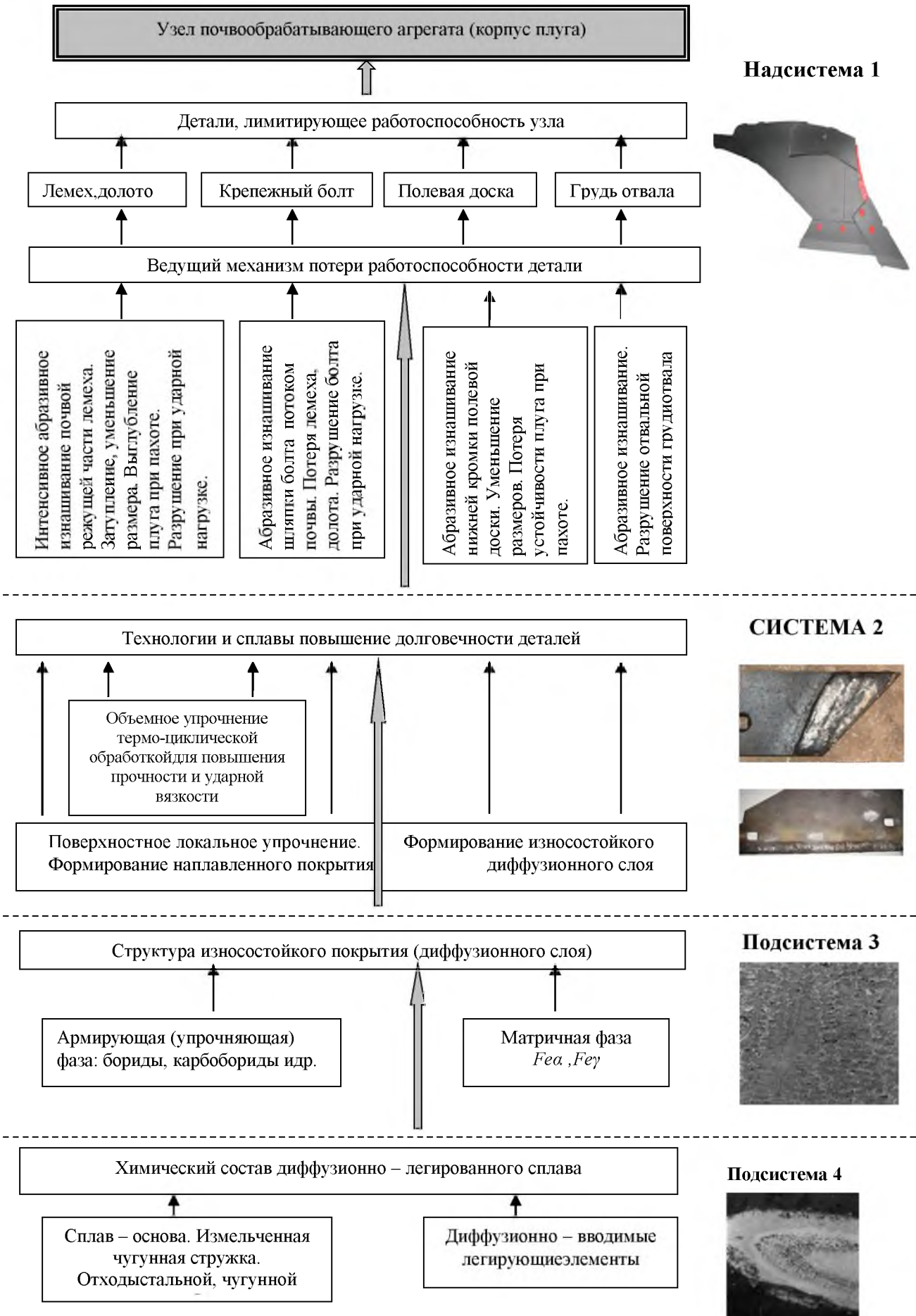


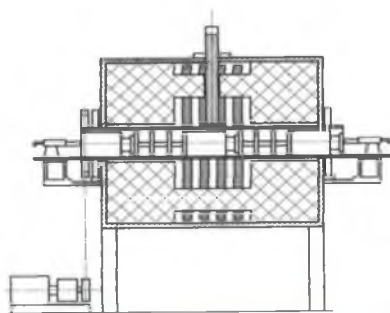
Рисунок 2 – Системный анализ повышения долговечности корпуса плуга

2. Упрочнение плужного лемеха индукционной наплавкой

Интенсивное абразивное изнашивание в почве обуславливает быстрое затупление лезвия лемеха и потерю работоспособности. Известно, что основными критериями работоспособности лемехов, во многом определяющими их ресурс, являются абразивная износостойкость лезвия и толщина лезвия при эксплуатации. В настоящее время лишь некоторые европейские производители выпускают наплавленные почворежущие детали, предназначенные для обработки особо твердых почв. Чаще всего используется наплавка белых износостойких чугунов [12-14]. Следует отметить повышенную хрупкость указанных наплавов в условиях ударных нагрузок (рис.1,б).

Для условий Республике Беларусь упрочнение лемехов наплавкой износостойкими сплавами является одним из эффективных способов повышения их работоспособности. Наплавочные сплавы для упрочнения получают диффузионным легированием измельченной чугуновой стружки, отходов стальной, чугуновой дроби. Диффузионное насыщение чугуновой стружки и дроби приводит к образованию после наплавки гетерогенных дисперсных структур эвтектического типа, отличающихся высокими механическими и трибологическими свойствами [8]. Абразивная износостойкость таких сплавов не уступает износостойкости сплавов типа «Сормайт». Для достижения высоких эксплуатационных свойств лемехов как правило проводится термическая обработка после наплавки. Термическая обработка по оптимизированным режимам в ряде случаев позволяет обеспечивать самозатачиваемость лезвия в заданных агроклиматических условиях [9].

Опыт применения диффузионно-легированных сплавов для индукционной наплавки обнаружил ряд недостатков, которые в дальнейших работах были устранены. Первоначально для диффузионного легирования применяли тупиковые барабанные печи с одним герметизируемым вращающимся контейнером дискретного действия [15]. Указанные печи имели относительно низкую производительность из-за дискретности обработки единственного контейнера. В дальнейшем были разработаны и изготовлены для ряда заказчиков барабанные печи проходного типа с поступательным перемещением в процессе обработки нескольких контейнеров через различные зоны печи (рис.3, табл.1).



а)



б)



в)

Рисунок 3 – Схема (а) и внешний вид (б, в) различных исполнений барабанных печей проходного типа для диффузионного легирования наплавочных порошков

Таблица 1 – Технические характеристики установки диффузионного легирования специальных порошков для индукционной наплавки

Характеристика	Значение	Примечание
Тип печи	Барабанная вращающаяся печь с толкательным механизмом перемещения герметизируемых контейнеров с порошковой смесью.	
Минимальная и максимальная температура обработки порошка	от 500 °С до 1000 °С	Допускаемое отклонение температуры -- $\pm 30^{\circ}\text{C}$
Габаритные размеры	1400м – 1100м – 2100м	
Установленная мощность	до 40 кВт	
Масса установки без шкафа управления	500 кг	
Размер вращающегося барабана	Диаметр – до 200мм Длина – до 1000 мм	
Производительность изготовления наплавочного порошка	3-5 кг/час	Дискретный режим работы
	до 10 кг/час	Непрерывный режим работы
Дисперсность обрабатываемого порошка	0,1–0,8 мм	Используемые материалы зависят от сырьевых ресурсов Заказчика и от требуемого состава наплавочного порошка
Насыпная плотность порошка	3,0–7,0 г/см ³	
Обрабатываемые материалы	Измельченная чугунная и стальная стружка. Ферросплавы. Стальная, чугунная дробь. Медные отходы.	

Промышленное применение разработанных печей потребовало проведения исследований по изучению стабильности результатов получения диффузионно-легированных сплавов при непрерывно-последовательном режиме обработки во вращающихся контейнерах с трех – и четырехконтейнерной загрузкой. Общая температурно-временная схема работы установки с непрерывно-последовательной обработкой контейнеров изображена на рисунке 4. На рисунке 5 показана температурно-временная схема непрерывно-последовательного процесса диффузионного легирования чугунной дроби ДЧЛ 08 в четырех контейнерах при температуре 950° С и темпе толкания – 1 час.

Изучение проводили при диффузионном легировании отходов чугунной дроби ДЧЛ 08 фракцией 400...630 мкм. Полученные результаты подтвердили достаточную для производственных условий равномерность диффузионного легирования порошка в различных контейнерах для всего требуемого диапазона размеров частиц (рис.6). Применение многоконтейнерной схемы и дискретно-последовательного режима обработки позволило существенно повысить производительность диффузионного легирования (табл.1).

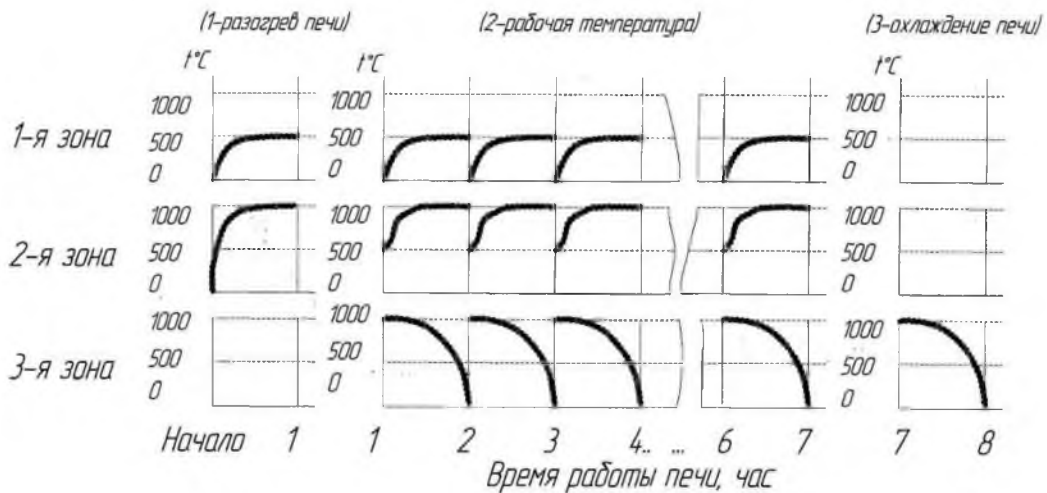


Рисунок 4 – Схема температурно-временных параметров непрерывно-последовательной обработки контейнеров во вращающейся электрической печи

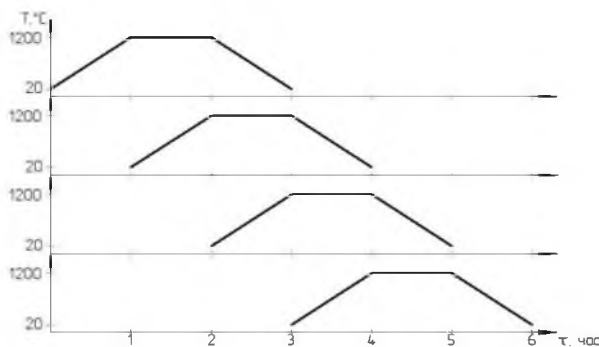


Рисунок 5 – Схема температурно-временных параметров непрерывно-последовательной обработки четырех контейнеров во вращающейся электрической печи

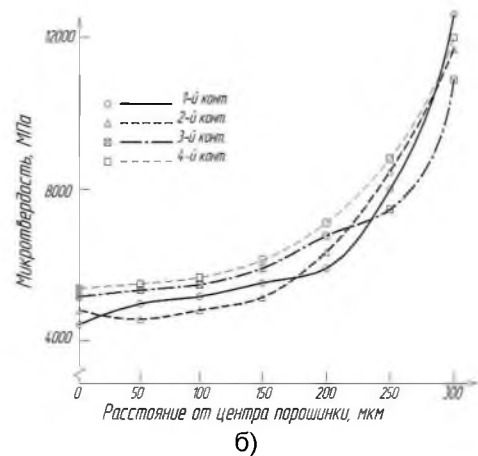
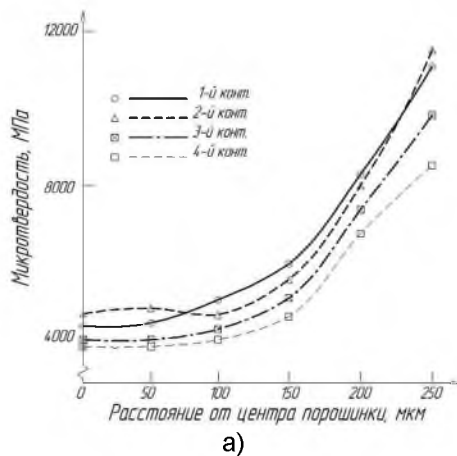


Рисунок 6 – Распределение микротвердости от края к центру в чугуниной дроби ДЧЛ 08 после диффузионного легирования в четырех вращающихся контейнерах а) – размером 400...630 мкм; б) – размером более 630 мкм

Следующим проблемным моментом была относительно высокая тугоплавкость ДЛ-порошков для условий индукционной наплавки. Дело в том, что каждая гранулометрически самостоятельная частица ДЛ-сплава содержит относительно тугоплавкую боридную оболочку ($1389\text{ }^{\circ}\text{C}-\text{Fe}_2\text{B}$ и $1540\text{ }^{\circ}\text{C}-\text{FeB}$) и металлическое ядро (рис.7,а). Это создает определенные трудности при низкотемпературных процессах индукционной наплавки. В ранее выполненных исследованиях было установлено предпочтительное наличие в боридной оболочке низкобористой фазы Fe_2B [6]. Однако, даже такой вариант ДЛ-порошка требовал специальных приемов для получения

качественной наплавки при индукционном нагреве. Качественное расплавление ДЛ-порошка происходило после нескольких циклов кратковременного нагрева с обязательным наличием флюса [9]. Теоретический анализ и экспериментальные работы позволили предложить технологический подход по снижению температуры плавления ДЛ-сплава для индукционной наплавки. Высокотемпературная обработка при частичном или полном оплавлении ДЛ-порошка в плазме электрической дуги позволяет получить эвтектическую легкоплавкую оболочку или полностью эвтектическую структуру всей частицы (рис. 7, б) [16].

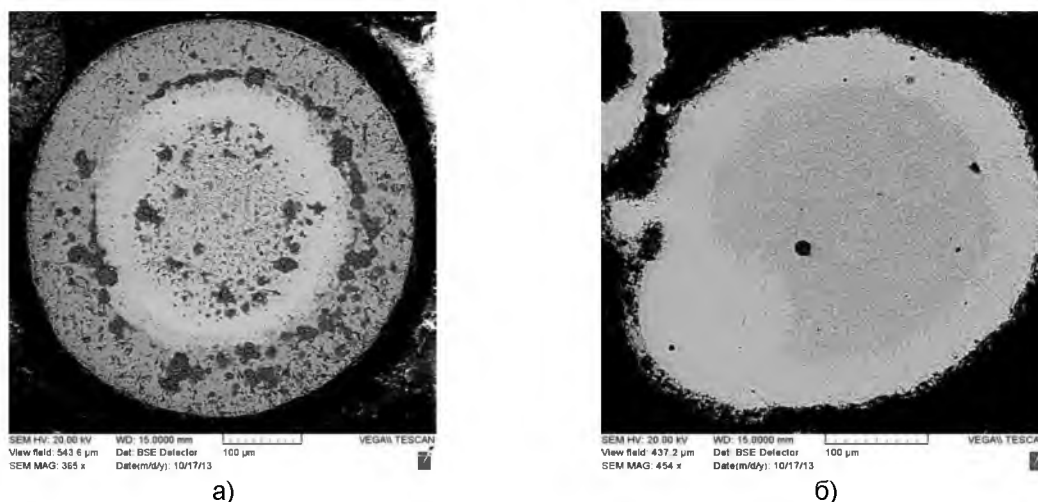


Рисунок 7 – Микроструктура диффузионно-легированного сплава на основе чугуна ИЧХ28Н2

а) – после диффузионного легирования бором; б) – после дополнительной обработки концентрированным источником энергии

В качестве источников тепла при кратковременной высокотемпературной обработке использовали оригинальную установку на базе источника УПУ-ЗД. Анализ литературных данных, микроструктуры, микротвердости и химического состава в оплавленных сплавах из чугуна ДЧЛ 08 и ИЧХ28Н2 позволил предложить схему контактного эвтектического плавления в ДЛ-сплавах на основе металлических отходов производства при кратковременной высокотемпературной обработке концентрированными источниками энергии. После оплавления концентрированными источниками энергии в структуре ДЛ сплавов могут присутствовать:

1. Локальные участки с эвтектической структурой между тугоплавкой оболочкой и металлическим ядром;
2. Прослойки с эвтектической структурой различной толщины между тугоплавкой оболочкой и металлическим ядром;
3. Ядро с эвтектической структурой со сплошными, либо фрагментарными участками тугоплавкой оболочки на поверхности.

Регулируя интенсивность влияния (температуру) и продолжительность нахождения в зоне обработки ДЛ сплавов можно получать ДЛ сплавы с различной концентрацией эвтектических составляющих в структуре. Сравнение результатов индукционной наплавки ДЛ сплава из чугуна ИЧХ28Н2 (рис.8,а) [17] без предварительного оплавления, подтвердило отсутствие полного сплавления наплавочного сплава с основой. Зафиксированы лишь локальные области, в которых начинается процесс частичного сплавления шихты и основного металла.

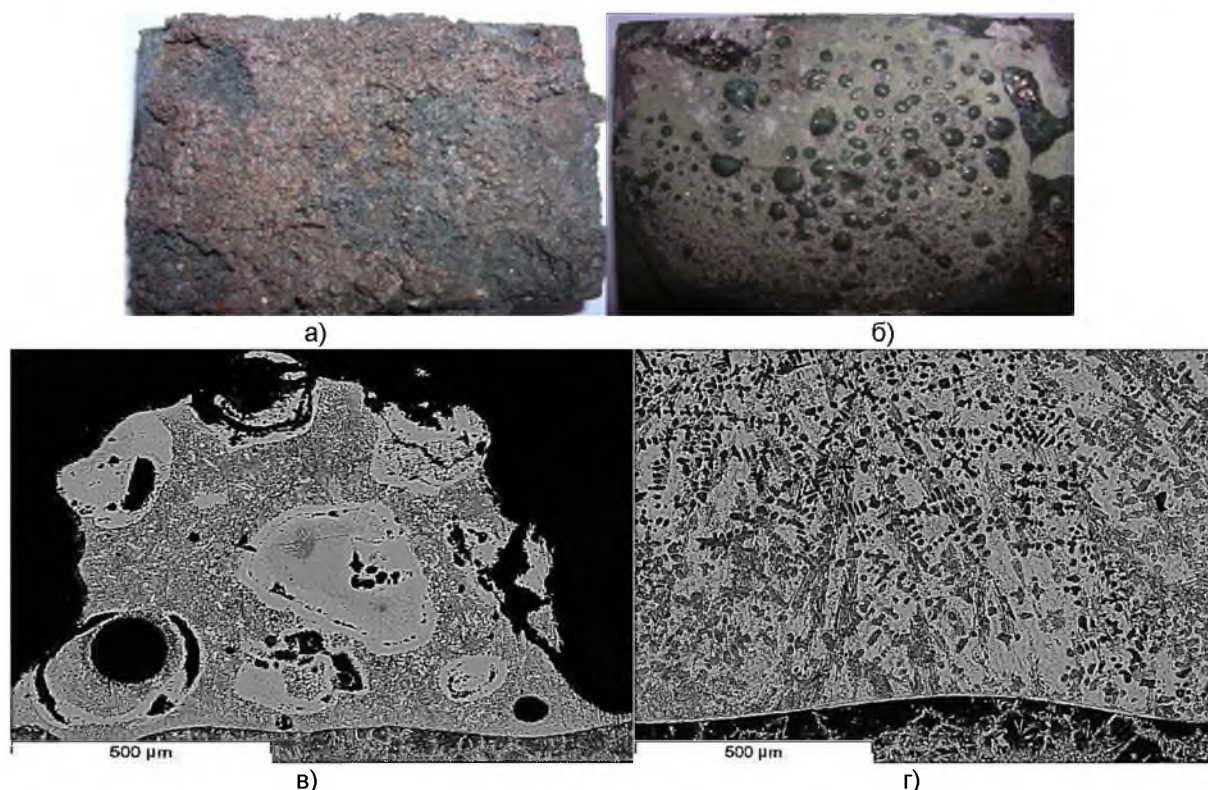


Рисунок 8 – Внешний вид и микроструктура наплавки из диффузионно легированной дроби ИЧХ28Н2 до (а,в) и после (б,г) кратковременной высокотемпературной обработки концентрированными источниками энергии

ДюрOMETрический анализ фрагментов не расплавившихся частиц ДЛ сплава выявил высокую твердость сохранившегося диффузионного слоя (10000... 11000 МПа), что подтверждает незавершенность диффузионных процессов во время изотермической выдержки при индукционной наплавке. Из-за отсутствия сплавления при изотермической выдержке в наплавке присутствует значительная пористость – до 40% (рис.8,в). Следует отметить так же, что бор, находясь в связанном состоянии в бориде, оказывает недостаточное раскисляюще-флюсующее действие. Поэтому имеет место окисление отдельных фрагментов и недостаточное сплавление с подложкой (рис.8,а). Эвтектическая борсодержащая структура оплавленного порошка, напротив, обеспечивает раскисление и формирование качественной наплавки (рис.8,б,г). Твердость наплавки из ДЛ отходов чугуна ДЧЛ 08 и ИЧХ28Н2 составляет 850 HV и 950 HV. Пористость незначительная и не превышает 1...1,5%. Абразивная износостойкость наплавки в 2,5...3 раза выше, чем у стали 45, после закалки и низкого отпуска (рис.9).

Технико-экономическая целесообразность проведения процесса предварительной кратковременной высокотемпературной обработки концентрированными источниками энергии ДЛ сплавов перед индукционной наплавкой подтверждена расчетами. Установлено, что суммарное значение затраченной энергии при получении защитного покрытия из 1 кг ДЛ сплавов на основе дроби ДЧЛ 08 и ИЧХ28Н2 без предварительного оплавления составляет 16,67 кВт, а с предварительным оплавлением 15,46...15,92 кВт, что на 4,5...7,2% ниже. Таким образом, энергозатраты использованные для предварительного оплавления ДЛ сплавов из отходов дроби ДЧЛ 08 и ИЧХ28Н2 снижают общие энергозатраты при получении защитного покрытия наплавкой ТВЧ при одновременном повышении качества наплавки. Упрочнение наплавкой лемехов в производственных условиях осуществляли в щелевых индукторах различных конструкций (рис.10).

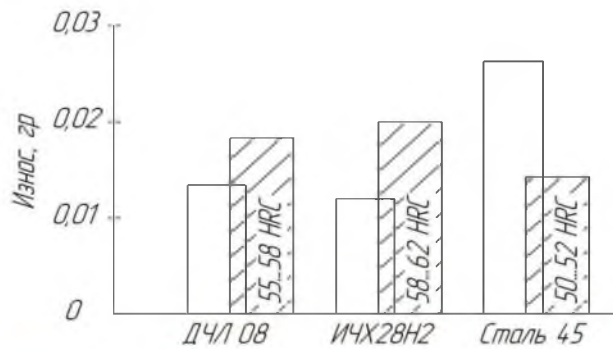


Рисунок 9 – Абразивная износостойкость и твердость наплавки из ДЛ-сплавов



а)



б)



в)



г)

Рисунок 10 – Промышленное внедрение индукционной наплавки плужных лемехов
а), б) наплавочные индуктора Минского завода шестерен и Пинского завода «Кузлитмаш»;
в) процесс индукционной наплавки; г) упрочнённые лемеха

Грудь отвала, полевая доска являются деталями, обеспечивающими устойчивую пахоту за счет формирования отвального пласта и прямолинейного движения корпуса. Они в меньшей степени подвержены абразивному изнашиванию. Интенсивное изнашивание присутствует лишь на кромках этих деталей, испытывающих повышенное давление почвенной массы. Поэтому для этих деталей разработана и освоена в производстве технология локального упрочнения наплавкой изнашиваемых рабочих кромок. Твердость наплавленного слоя до 58 HRC_s, толщина наплавленного слоя до 2,5 мм. Результаты полевых испытаний на Белорусской МИС свидетельствуют, детали с упрочнением, изнашиваются в 1,2–3,0 раза менее интенсивно, чем детали, изготовленные по традиционной заводской технологии.

3. Упрочнение плужных оборотных долотьев

Долото является наиболее тяжело нагруженной, интенсивно изнашиваемой почворежущей деталью корпуса плуга. В процессе работы оно подвергается воздействию абразивной массы, также изгибающим и ударным нагрузкам. Зарубежные производители, т.к. «Kverneland» (Норвегия), «Rabewerk» и «Lemken» (Германия), «Huard» (Франция), «Overum» (Швеция), «Paraplaw» (Англия), «Raba» (Венгрия) выпускают рабочие органы плугов из прочных легированных сталей имеющие

временное сопротивление разрыву 1600–2000 МПа. Твердость на поверхности рабочего органа достигает 580–660 HV.

Фирма «Kverneland» использует для своих деталей стали типа 40XГР с последующей термической обработкой на твердость 50...55 HRC, при этом размер зерна составляет 8...10 баллов. Микроструктура стали по всему сечению изделия представляет собой мелкоугольчатый мартенсит с небольшим количеством остаточного аустенита. Фирма «Unia» применяет более дешевую сталь аналогичную стали 35ХГСА с термической обработкой на твердость 44...48 HRC. При этом микроструктура представляет собой троостит отпуска.

Отечественные детали корпусов плугов имеют ресурс наработки в 1,5–2,0 меньше западных аналогов. В отечественном производстве используют недорогие низколегированные конструкционные стали 65Г, 40Х и др. Весьма перспективным представляется использование сталей пониженной прокаливаемости [16,17]. Термическая обработка такой стали предполагает индукционный нагрев с последующим спрейным охлаждением и самоотпуском. Значения твердости поверхности – 60...65 HRC, а сердцевины – 40...45 HRC, что может обеспечить надежность и долговечность готового изделия в определенных условиях пахоты.

Повышение конструкционной прочности оборотных долот заключается в повышении механических свойств стали, определяющих надежность и долговечность детали. К ним относятся ударная вязкость и твердость поверхности и сердцевины. Параметры являются важнейшими, потому что деталь во время эксплуатации находится под воздействием ударных нагрузок, а также под абразивным воздействием твердых частиц почвы. С учетом условий эксплуатации данной детали была разработана схема макрорегулярного распределения структур. Доказано, что на рабочей части долота, режущей почву, требуется формировать твердые износостойкие структуры (мартенсит, цементит) на поверхности, а в сердцевине – троостит, мартенсит отпуска [18]. Благодаря упрочненной поверхности и сердцевине деталь будет изнашиваться равномернее и долговечность повысится. Средняя часть детали, в которой располагаются крепежные отверстия, в процессе эксплуатации воспринимает ударные и изгибающие нагрузки, передающиеся от рабочей части детали, то есть система крепления представляет своего рода консоль с жестким закреплением. Если нагрузка превышает предел прочности, то происходит излом в этой части. Поэтому требуется получить вязкие структуры на поверхности и в сердцевине (троостит, сорбит и т.п.) крепежной части детали.

Упрочнения состоит в локальной нитроцементации режущей части с последующей циклической термической обработкой. Полученная дисперсная структура мартенсита отпуска на режущей части позволила добиться улучшения механических свойств стали. Благодаря циклической термической обработке, комплексному упрочнению поверхности стали (нитроцементация) и сердцевины (сквозная закалка) с макрорегулярным распределением микроструктур, рабочая часть детали имеет твердость до 66 HRC на поверхности, а в сердцевине до 55 HRC и ударную вязкость 35 ± 3 Дж/см². Средняя часть долота имеет твердость до 45 HRC и ударную вязкость до 60 ± 3 Дж/см². Полевые испытания опытной партии упрочненных долот на Белорусской машиноиспытательной станции подтвердили повышение долговечности упрочненных долот по сравнению с серийно выпускаемыми в 1,4–1,7 раза. Ресурс упрочненных долот находится на уровне продукции фирмы «Kverneland» (22–25 га).

4. Упрочнение крепежных болтов

Крепежные болты обеспечивают надежную фиксацию износостойких деталей на корпусе плуга. Во время работы на тяжелых почвах сильное влияние на ресурс детали оказывает износ головки болта, который обусловлен постепенным «вымыванием» почвой мягкого металлического сплава (относительно закрепляемой детали) крепежного элемента в посадочном отверстии лемеха или долота. Это приводит к преждевременному нарушению целостности конструкции. В результате происходит отрыв долота и лемеха от плуга (рис.11). Важное значение имеет прочность и ударная вязкость болта.



Рисунок 11 – Корпус плуга с утраченными долотом и лемехом из-за разрушения шляпок крепежных болтов. Выработка 21 Га. Песчаные почвы

В настоящее время для изготовления крепежных изделий наиболее часто используют углеродистые стали (0,1-0,5 % масс. С) по ГОСТ 1759.4. Наиболее распространенными являются крепежные элементы с классами прочности 5.6, 5.8, 6.6, 6.8, а также высокопрочный крепеж 8.8-12.9. Основными материалами для изготовления болтов являются стали марок 20 и 40Х, изделия получают с помощью холодной и горячей штамповки с дополнительной термической обработкой или без нее. Холодная штамповка позволяет получить изделия с пределом прочности от 400 до 600 МПа и пределом текучести от 240 МПа до 480 МПа. Такую прочность готовому изделию придает микроструктура феррита и перлита после пластической деформации, образующаяся по сечению заготовки в процессе обработки, ниже температуры рекристаллизации, используемых материалов (сталь 20, 40Х). При горячей штамповке получают заготовки с аналогичными механическими характеристиками, но с меньшей поверхностной твердостью. Более прочные крепежные элементы получают при дополнительной термической обработке, которую проводят после штамповки. Применяют средний и высокий отпуск. При данных видах отпуска формируется микроструктура троостита или сорбита. Данные структуры позволяют получить предел прочности на растяжение 800-1200 МПа, предел текучести от 640 до 1080 МПа, а также твердость поверхности и сердцевины готового изделия от 30 до 40 HRC. Дополнительных требований по износостойкости головки крепежного элемента, действующие нормативные документы не предусматривают.

Повышение износостойкости головки крепежного элемента является более сложной научно-технической задачей. В этом случае требуется получить готовое изделие с высокими значениями твердости и износостойкости поверхности, но при этом не должны быть ухудшены механические свойства стержня (прочность, пластичность, вязкость). Подобные требования характерны, например, для болтов крепления броневых плит в измельчающих механизмах, защитных элементов горнодобывающего оборудования, сельскохозяйственных машинах. В ряде случаев ресурс защитного элемента или рабочего органа лимитируется долговечностью крепежа, который разрушается при интенсивном абразивном воздействии окружающей среды.

Для получения крепежного элемента с износостойкой головкой необходимо учитывать, что болт представляет собой цилиндрический стержень с головкой на одном конце и внешней резьбой на другом с однородной микроструктурой по сечению (феррит и перлит, троостит, сорбит). Наиболее тяжело нагруженной частью болта является его резьбовая часть в месте соединения с головкой, она испытывает крутящий момент, образующийся во время навинчивания гайки, и растягивающие напряжения при взаимодействии детали с внешней средой, головка болта в свою очередь подвергается воздействию абразивных частиц. Поэтому, исходя из условий работы крепежного элемента и нагрузок, целесообразно сохранить исходную микроструктуру на ножке болта феррита и перлита, сорбита или троостита, а на головке получить износостойкую структуру, например, мартенсита (рис. 12).



Рисунок 12 –Требуемое распределение структур по сечению упрочненного крепежного элемента

Сочетание исходной микроструктуры резьбовой части и износостойкой на головке позволит сохранить класс прочности и улучшить трибологические свойства крепежных элементов, работающих в условиях интенсивного абразивного изнашивания при ударных и растягивающих нагрузках. Однако, недопустимо, чтобы микроструктура крепежного элемента по сечению была мартенситной. В этом случае при работе может произойти хрупкое разрушение, что приведет к нарушению целостности конструкции.

Для того, чтобы сформировать микроструктуры в соответствии с описанной схемой локального распределения структур на готовых деталях необходимо использовать такую термическую обработку, чтобы нагрев оказывал влияние на структурные превращения лишь на определенных участках детали. К такому виду упрочнения можно отнести электро-химико-термическую обработку, локальную закалку, отпуск с индукционным нагревом, а благодаря тому, что способ нагрева позволяет регулировать скорость, можно добиться высокой производительности процесса упрочнения. Таким образом, в качестве альтернативы традиционным способам объемной химико-термической и термической обработки целесообразно использовать высокоскоростное диффузионное насыщение поверхности сталей из порошков, газовой или жидкой сред с использованием индукционного нагрева (электро-ХТО), проводить термическую обработку с термоциклированием.

Авторами было изучено влияние циклического нагрева на формирование диффузионного слоя при высокотемпературном насыщении из паст. Исследования показали, что циклический нагрев, заключающийся в перегреве образцов крепежных элементов из стали 20 на 200°C выше точки A_{c3} и охлаждении до температуры окончания аустенитного превращения, что ниже точки A_{c1} на 100 °C, приводит к интенсификации диффузионных процессов, измельчению микроструктуры слоя и основного металла, а также позволяет увеличить значения микротвердости.

Кинетика диффузионного насыщения с циклическим нагревом имеет нелинейную зависимость от количества циклов. Установлено, что за один цикл, равный 2 минутам, глубина высокоуглеродистого слоя составила 280 мкм, за четыре цикла – 340 мкм. Помимо интенсификации процесса наблюдается значительная диффузия углерода вглубь основного металла. Как показал металлографический анализ, в сердцевине образцов при четырехкратной термоциклической обработке (ТЦО) феррит практически отсутствует (рис.13). При увеличении частоты смены температурного режима до восьми, скорость роста слоя снижается, и глубина составляет всего 180 мкм. Это можно объяснить тем, что при 8 циклах 15 секундной выдержки в высокотемпературной зоне при каждом цикле не достаточно для проникновения углерода и азота вглубь материала.

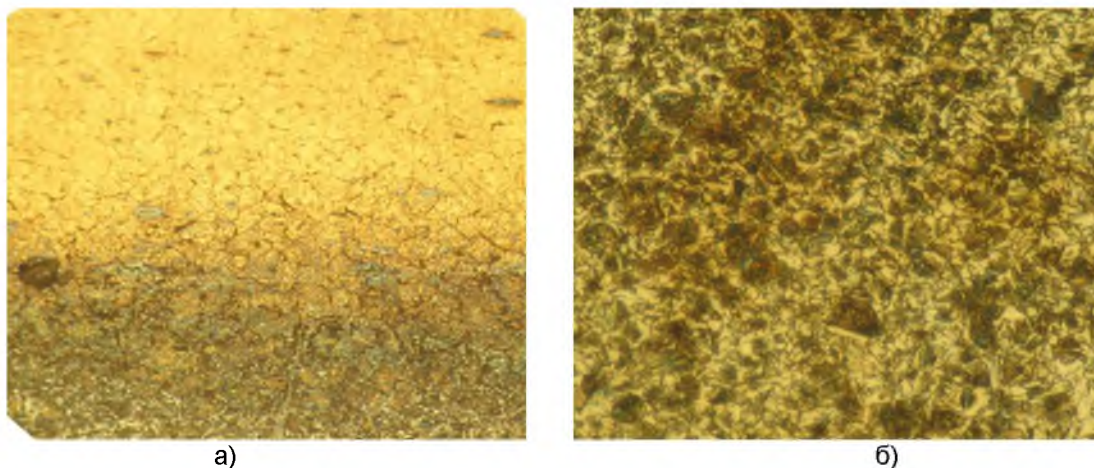


Рисунок 13 – Диффузионный слой после ЭХТО с циклическим нагревом, $\times 500$
 а) – диффузионный слой; б) – сердцевина металла

Интенсификация процесса насыщения и формирование мелкозернистой структуры при ТЦО обусловлены следующими физическими причинами. При многократной смене температуры происходит микродеформация зерен из-за структурных и термических напряжений, в результате чего происходит фазовый наклеп металла, который сопровождается рекристаллизацией [18]. Дополнительному измельчению и зарождению новых мелких аустенитных зерен способствует развитая во время термоциклирования блочная структура зерен. Зародыши новой фазы и новых рекристаллизованных зерен могут возникать не только на границах, но и на блоках мозаики. Как известно, индукционный метод нагрева со скоростью от 10 до 100 °C/с обеспечивает развитие процессов превращения и на границах блоков мозаики. Диффузия по движущимся границам зерен протекает быстрее, чем по неподвижным. При деформации возрастает плотность дислокаций и вакансий в объеме зерен, и взаимодействие мигрирующих границ с дефектами приводит к увеличению свободного объема границ, что, обуславливает существенное увеличение коэффициента зернограницной диффузии D_{gr} . При высоких температурах, когда роль объемной диффузии существенна, движущиеся границы с высоким D_{gr} играют роль источников, из которых атомы примеси диффундируют в объем зерен.

Результатом ЭХТО совместно с термоциклированием явилось то, что микротвердость диффузионного слоя выросла по сравнению с изотермическим процессом насыщения, стала более равномерна. Ее колебания в пределах слоя составили 820-780 HV.

Повышение микротвердости в диффузионном слое и сердцевине образцов обусловлено тем, что при нитроцементации из паст с последующей закалкой в слое сохраняется большое количество остаточного аустенита. Но в процессе многократной фазовой перекристаллизации при ТЦО в высокоуглеродистом аустените протекают процессы перераспределения углерода и выделения цементита, что вызывает обеднение аустенита углеродом. В результате аустенит становится менее устойчивым. При повторном нагреве выделившиеся частицы цементита практически не растворяются при максимальной температуре, т.к. скорость нагрева высока и времени для их растворения недостаточно, а образовавшийся из высокоуглеродистого аустенита перлит превращается в менее легированный углеродом аустенит. При повторном охлаждении до нижней температуры цикла доля остаточного аустенита уменьшается, и так далее с каждым циклом.

Исследования структурообразования диффузионных слоев и сердцевины детали при циклической ЭХТО позволили установить, что проведение данного процесса целесообразно для изделий из низкоуглеродистых сталей. Этот способ позволяет получить крепеж, в котором присутствуют в шляпке мелкодисперсная структура легированного мартенсита, отвечающая за износостойкость. Локальное циклическое

ЭХТО обеспечивает прочные и пластичные структуры, отвечающие за класс прочности болта [19].

Для крепежных элементов из стали 40X, прошедших предварительную термическую обработку, была рассмотрена возможность использования локальной закалки с последующим низким отпуском для снятия термических напряжений. Технологическая операция заключалась в быстром индукционном нагреве до 850 °С и охлаждении в масле и дополнительном низком отпуске при 180 °С в течение 2 часов. Эта технологическая операция проводилась для получения максимально возможной глубины упрочненного слоя с высоким значением твердости по сечению головки болта. При обработке требовалось учитывать, что максимальная глубина закаленного слоя с мартенситной структурой не должна располагаться на границе между головкой и резьбовой частью болта, т.е. в самом нагруженном месте. Это является нежелательным явлением, снижающим прочность. Глубина упрочненного слоя регламентируется, исходя из того, что крепежный болт должен работать с закрепляемой деталью согласованно и до предельного износа детали. Таким образом, требуется добиться равномерного изнашивания с закрепляемой деталью за счет твердости, сопоставимой с основной деталью.

Для получения требуемой глубины упрочненного слоя были подобраны оптимальные параметры индукционного нагрева. Частота генератора влияет на глубину проникновения тока в металл, чем она выше, тем ниже глубина, а мощность установки определяет глубину зоны термического влияния, возникающей из-за теплоотвода с поверхности детали. Таким образом, необходим высокочастотный генератор с большой мощностью, который обеспечивает упрочненный слой в 5-8 мм. Выбранные параметры установки позволили получить требуемое распределение твердости по сечению головки и ножке болта (рис. 14).

Таким образом, стандартные испытания крепежных элементов позволили установить, что изготовление износостойкого крепежа с высокими показателями прочности и пластичности резьбовой части в сочетании с требуемыми трибологическими свойствами технически возможно [20].

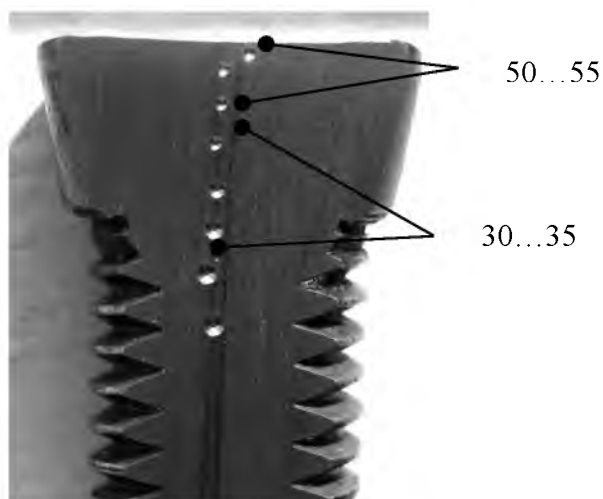


Рисунок 14 – Распределение твердости по сечению крепежного элемента после локальной закалки с отпуском

После локального упрочнения однородная макроструктура болта меняется на макрогетерогенную, следовательно, измениться должны и механические характеристики. Поэтому упрочненные крепежные элементы были подвергнуты дополнительным прочностным испытаниям. Разрушение испытуемых образцов происходило по телу крепежной части болта при нагрузках соответствующих 6 и 12 классу прочности. Однако болты, выполненные из стали 40X, имеющие структуру сорбита по сечению, не прошли испытание. С повышением нагрузки происходило деформирование конусной головки болта, ее сжатие, и в результате на значении 72 кН болт протягивался через шайбу без разрушения. Этот эффект скорее всего можно

объяснить лишь конусной формой головки болта, которая имеет малую опорную площадь. Упрочненные крепежные элементы достигли максимальной нагрузки до разрушения, которая составила 82 кН, при этом изменения геометрических размеров головки болта не наблюдалось. Относительное удлинение, характеристика пластичности, составило от 16 % на образцах стали 20 и 10,5 % на стали 40Х. Полученные значения δ соответствуют табличным параметрам из ГОСТ 1759.4-87 в соответствии с временным сопротивлением.

Испытания болтов, упрочненных при помощи ЭХТО, показали, что происходит срез трех-четырех витков резьбы при нагрузках 35 кН и 60 кН для сталей 20 и 40Х. Разупрочнения на стали 20 не наблюдается, а болты из 40Х становятся менее прочными, это вызвано значительной зоной термического влияния при ЭХТО, в результате чего изменяется микроструктура резьбовой части с троостита на феррито-перлитную смесь, которая имеет меньшее значение сопротивлению разрыву.

Таким образом, благодаря локальному упрочнению (ЭХТО из паст с циклическим нагревом, индукционная закалка) удалось сформировать на крепежном элементе дисперсные микроструктуры, обеспечивающие требуемые износостойкости и прочность готового изделия. Проведенные испытания в соответствии с ГОСТ, подтвердили, что упрочненный крепеж соответствует классам прочности 6-му и 12-му.

На производственной базе Минского завода шестерен в рамках выполнения ряда заданий Государственных научно-технических программ был освоен комплекс технологий повышения долговечности быстро-изнашиваемых деталей корпусов плугов отечественного производства (рис.15). Выполненные работы обеспечили повышение долговечности деталей и ресурса корпуса плуга в целом (табл.2). Это позволило снизить удельные затраты при использовании более долговечных корпусов и повысить конкурентоспособность продукции.

В течение более 10 лет были проведены многочисленные полевые испытания упрочненных лемехов в различных почвенно-климатических условиях (Белорусская машиноиспытательная станция, Северо-западная машиноиспытательная станция Российской Федерации, различные сельхозпредприятия Беларуси). Во всех случаях упрочнение обеспечивало повышение долговечности лемеха. Наибольший эффект зафиксирован на тяжелых суглинистых и супесчаных почвах – до 2,5 раз. Техно-экономические оценки показывают, что применение упрочненных лемехов позволяет снизить суммарные затраты на обработку 1 га земли на 0,6...2,9 €.



Рисунок 15 – Корпус плуга Минского завода шестерен с упрочненными быстроизнашиваемыми деталями

Таблица 2 – Результаты приемочных полевых испытаний корпуса плуга МЗШ. Нарботка 405 Га

Деталь	Средний износ, мм		Относительное повышение ресурса упрочненной детали
	Длина	Толщина	
Грудь отвала			
ППН.8.30/50 – 312 (стандартная технология)	0,4	0,63	--
ППН.8.30/50 – 312 У (упрочненный)	0,1	0,4	1,74 – 1,8
Полевая доска			
ППН.8.30./50 – 302	--	2,66	--
ППН.8.30./50 – 302 У	--	1,24	2,1
Болт для крепежа долот			
ППН.8.30/50 – 308	4,4	--	--
ППН.8.30/50 – 308 У	2,6	--	1,7 – 1,26
Болт для крепежа груди отвала			
ППН.8.30/50 – 306	0,7	--	--
ППН.8.30/50 – 306 У	0,4	--	1,75
Болт для крепежа полевой доски			
ППН.8.30/50 – 307	0,1	--	--
ППН.8.30/50 – 307 У	0,05	--	2,0

Особо следует отметить субъективный фактор освоения упрочняющих технологий. Опыт авторов свидетельствует о том, что затраты (материальные и «человеческие») на освоение в производстве новой технологии существенно выше, чем на ее разработку. Распространенные убеждения о легкости и отлаженности перехода разработанной технологии из научной лаборатории в производство ошибочны. Трудность этого перехода обусловлена как объективными (техническими) причинами, так и субъективным («человеческим») фактором. На предприятиях в большинстве случаев нет освобожденных квалифицированных специалистов, отвечающих за освоение новых технологий. Таким образом, техническое содействие в постановке новой продукции на производство является для инженерно-технического работника дополнительной нагрузкой помимо выполнения основных служебных обязанностей. В этой ситуации успешность освоения напрямую зависит от мотивации инженерно-технического персонала предприятия, их интереса к новым технологиям. Традиционная точка зрения о несвоевременности, нецелесообразности внедрения перспективных научно-технических разработок из-за тяжелого экономического положения предприятия зачастую приводит к дальнейшей стагнации производства, консервируя его техническую отсталость на обозримую перспективу. Важным является наличие соответствующего структурного подразделения и узкопрофильных специалистов в области трибологии и упрочняющих технологий.

Заключение

Активное применение энергонасыщенной техники и интенсификация почвообработки требует дальнейшего повышения долговечности почвообрабатывающих агрегатов. Этот вызов диктует необходимость перехода от упрочнения отдельных деталей к повышению долговечности всего узла. Недостаточная конкурентоспособность (в ряде случаев) белорусских почвообрабатывающих агрегатов обусловлена только засильем импортной техники, но и необходимостью комплексного повышения ресурса.

Создан, теоретически обоснован и практически реализован в промышленности концептуальный подход, позволяющий повысить долговечность корпуса плуга за счет комплексного упрочнения всех быстроизнашиваемых деталей узла (индукционная

наплавка, ХТО, ТО). Эффективность обсуждаемого подхода обусловлена разработкой специальных диффузионно-легированных сплавов и упрочняющих технологий, обеспечивающих сопоставимый с известными уровень эксплуатационных свойств, но имеющих значительно меньшую стоимость за счет применения недорогих конструкционных сталей, а так же использования отходов чугунной стружки и энергосберегающих режимов ХТО.

Усовершенствована технология получения диффузионно-легированных сплавов для индукционной наплавки из металлических отходов производства. Разработано и запатентовано оборудование для получения наплавочных диффузионно-легированных сплавов из металлических отходов производства с пониженной температурой плавления. Данная технология позволяет формировать износостойкие наплавки толщиной 1,5...2,0 мм с минимальной (1...1,5%) пористостью и твердостью 850...950 HV.

Широкомасштабная промышленная реализация разработанных и апробированных научно-технических решений позволит расширить конкурентные возможности белорусских почвообрабатывающих агрегатов и обеспечить более широкое импортозамещение.

Список литературы:

1. Севернев М.М. Долговечность и работоспособность сельскохозяйственных машин // Вопросы земледельческой механики / Под ред. М.Е. Мацепуро, Б.Н. Янушкевича. – Минск: Гос. изд-во с.-х. лит-ры БССР, 1962. – Т. 10. – Гл. 4. – С. 144–310.
2. Износ и коррозия сельскохозяйственных машин/ М.М. Севернев, Н.Н. Подлекарев, В.Ш. Сохадзе, В.О. Китиков; под ред. М.М. Севернева.— Мн., Белору. Навук, 2011.—333 с.
3. Восстановление деталей машин: Справочник / Ф.И. Пантелеенко, В.П.Лялякин, В.П. Иванов, В.М. Константинов; Под ред. В.П. Иванова.- М.: Машиностроение, 2003.— 672 с.
4. Ткачев В.Н. Работоспособность деталей машин в условиях абразивного изнашивания. – М.: Машиностроение, 1995. – 335 с.
5. Бернштейн Д.Б., Лискин И.В. Лемехи плугов. Анализ конструкций, условий изнашивания и применяемых материалов: Обзорн. информ. – М.: ЦНИИТЭИтракторосельхозмаш, 1992. – 36 с.
6. Пантелеенко Ф.И. Самофлюсующиеся диффузионно-легированные порошки на железной основе и защитные покрытия из них. – Мн.: УП "Технопринт", 2001. – 300 с.
7. Пантелеенко Ф.И., Константинов В.М. Ресурсо-энергосберегающий потенциал применения диффузионно-легированных сплавов в реновационных технологиях // Тяжелое машиностроение, 2004, №2, С. 21-27.
8. Пантелеенко Ф.И., Константинов В.М. Теоретические основы и технологии получения защитных покрытий из диффузионно-легированных сплавов Перспективные материалы и технологии; под общ.ред. В.В. Клубовича. – 2008. – Витебск: Изд-во УО «ВТГУ» – Глава 9, С. 187-214.
9. Константинов В.М., Пантелеенко Ф.И., Жабуренок С.Н. Повышение износостойкости при упрочнении плужных лемехов диффузионно-легированной чугунной стружкой // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2003. – № 5. – С. 17–20.
10. Константинов В.М. Комплексное повышение долговечности корпуса почвообрабатывающего плуга // Упрочняющие технологии и покрытия – 2014, №12. С.3-7.
11. Константинов В.М. Систематизация легирующих элементов в наплавочных сплавах на железной основе // Вестник БарГУ, – 2014 – Серия технические науки №2, С. 60 – 65.
12. Produkte [Electronic resource] / Rabe Agrarsysteme GmbH & Co. KG. – Mode access: <http://www.rabe-agrarsysteme.com>.

13. Produkte [Electronic resource]: The Agro Vision Company / Lemken. – Mode access: <http://www.lemken.com>.
14. Productos de Bellota [Electronic resource] / Bellota. – Mode access: <http://www.cofelam.com>.
15. Константинов, В.М. Пантелеенко Ф.И., Штемпель О.П. Синтез наплавочных порошков диффузионным легированием // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2002. – №5. – С. 15-18.
16. Щербаков В.Г. Диффузионно-легированные сплавы из металлических отходов производства с пониженной температурой плавления для формирования износостойких покрытий индукционной наплавкой токами высокой частоты / В.Г.Щербаков //Литье и металлургия. – 2016. № 4(85). – С. 89-96
17. Щербаков В.Г. Эффект контактного эвтектического плавления в диффузионно-легированных сплавах из металлических отходов производства при кратковременной высокотемпературной обработке концентрированными источниками энергии / В.Г.Щербаков // Металлургия: Республ. Межведом. сб. науч.тр. / БНТУ. – Минск, 2016. – Вып. 37. – С. 108-117.
18. Бетеня Г.Ф., Кривцов А.В., Литовчик Д.П. Анализ сравнительных эксплуатационных испытаний долоттракторных плугов//Агропанорама. – 2005. – №1. – С.9-12.
19. Шило И.Н. Повышение работоспособности деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин / И.Н.Шило [и др.]; Министерство сельского хозяйства и продовольствия республики Беларусь, Белорусский государственный аграрный технический университет. – Минск: БГАТУ, 2010. – 320 с.
20. Ткаченко, Г.А. Электро-химико-термическая обработка крепежных элементов почвообрабатывающих машин / Г.А. Ткаченко, В.М. Константинов // Металлургия: Республ. Межведом. сб. науч. тр. / БНТУ. – Минск, 2008. – Вып. 31. – С. 358-371.
21. Константинов В.М., Ткаченко Г.А. Упрочнение быстроизнашиваемых деталей почвообрабатывающих плугов нитроцементацией с локальным циклическим индукционным нагревом//Упрочняющие технологии и покрытия. – 2011. – №2. – С. 44 – 50.
22. Ткаченко Г.А. Особенности термической обработки железоуглеродистых сплавов в условиях циклического нагрева / Г.А.Ткаченко // Металлургия: Республ. Межведом. сб. науч.тр. / БНТУ. – Минск, 2016. – Вып. 37. – С. 155-164.