

УДК 621.793.620.172

СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПРИ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ ОБРАБОТКЕ СТАЛЬНЫХ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

д-р техн. наук, проф. М.И. ЧЕРНОВОЛ; Т.В. ВОРОНА
(Кировоградский национальный технический университет, Украина);

канд. техн. наук, доц. О.П. ШТЕМПЕЛЬ
(Полоцкий государственный университет);

канд. техн. наук Л.А. ЛОПАТА
(Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, Киев)

Представлены результаты анализа статистических данных долговечности и износостойкости деталей сельскохозяйственной техники. Показано, что износ, коррозия и усталостное разрушение деталей являются главной причиной отказов и, как следствие, приводят к нарушению агротехнических требований и уменьшению урожайности. Предлагается способ создания деталей с износостойкими покрытиями, сочетающий газопламенное и (или) электродуговое напыление сталей ферритного и мартенситного классов с последующим модифицированием напыленных покрытий электроконтактной обработкой.

Ключевые слова: электроконтактная обработка, газопламенное и электродуговое напыление, модифицирование, деформационные структурно-фазовые превращения, термомеханическое воздействие.

Состояние и актуальность проблемы. Повышение долговечности деталей – одна из основных проблем, определяющих направление и темпы развития сельскохозяйственной техники. При эксплуатации детали сельскохозяйственной техники работают в условиях абразивного и коррозионно-механического изнашивания, испытывают комбинированное влияние вибраций, температуры, агрессивных сред и других факторов, что приводит к необратимым процессам изнашивания. Основными факторами, определяющими вид износа рассматриваемых деталей, является среда, динамика и кинематика относительного перемещения трущихся тел, характер контакта и свойства материалов деталей.

На рисунке 1 представлены результаты анализа статистических данных долговечности и износостойкости деталей зерноуборочных и кормоуборочных комбайнов. Быстродействие механизмов копирования жатки зерноуборочных комбайнов в значительной степени определяется работоспособностью шарнирных сопряжений. При эксплуатации шарнирных сопряжений механизмов копирования жаток имеет место выдавливание смазки, что интенсифицирует процессы изнашивания поверхностей трущихся деталей и, как следствие, ухудшает качество работы механизмов копирования рельефа поля, приводит к нарушению технологического процесса уборки, к поломке жатвенного агрегата и потерям зерна. У шнеков жаток зерноуборочных комбайнов в результате деформации витков спирали и изгиба цапф нарушается балансировка (рис. 1, а). В кормоуборочных (рис. 1, б) и кукурузоуборочных комбайнах изнашиваются режущие элементы (ножи и противорежущие пластины), подшипники главного вала, посадочные гнезда корпусов подшипников и посадочные места на валу.

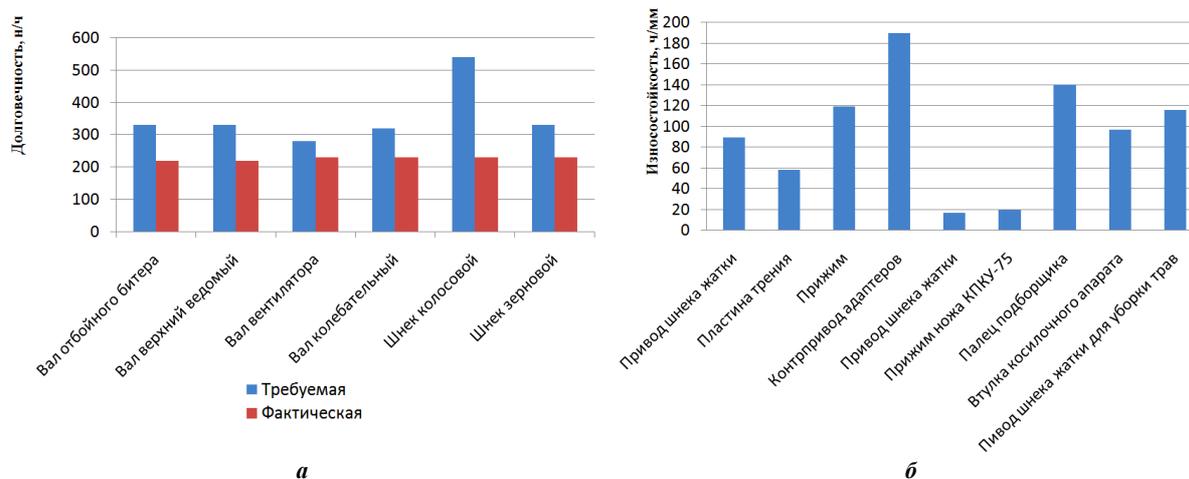


Рисунок 1 – Результаты анализа статистических данных по долговечности (а) и износостойкости (б) деталей зерноуборочных (а) и кормоуборочных комбайнов (б)

Износ режущих элементов кормоуборочных комбайнов обусловлен коррозионно-механическим изнашиванием и определяется кинематическими особенностями процесса резания (табл. 1).

Таблица 1 – Причины отказов рабочих органов сельскохозяйственных машин

Технологическая схема	Вид и условия изнашивания	Примеры изнашиваемых деталей	Доля отказов, %		
			затупление кромки	поломки при ударах	разрушение в результате усталости
	абразивное При перемещении в абразивной среде	Сегменты жаток, детали режущего аппарата, шнеки	80	15	5
	абразивно-механическое При перемещении в абразивной среде	Сегменты жаток, детали режущих аппаратов, шнеки	80	15	5
	абразивно-коррозионно-механическое При измельчении растительной массы	Детали измельчительного барабана кормоуборочных машин	60...70	20...25	10...15

При износе лемеха ухудшаются агротехнические показатели вспашки (неравномерность глубины) и увеличивается тяговое сопротивление плуга. При износе лап культиваторов ухудшаются агротехнические показатели (не срезание сорняков, плохое крошение почвы) и увеличивается тяговое сопротивление культиваторов и почворезов. Основные дефекты лап культиваторов: износ, затупление лезвия и носка, трещины и сколы на рабочей поверхности.

Как показывает практика [4], основной причиной отказов почвообрабатывающих агрегатов типа «агрегат культиваторный широкозахватный» является интенсивное изнашивание сопрягаемых поверхностей корпусных опор. Диски луцильников, борон и сеялок в процессе эксплуатации затупляются и изнашиваются по толщине и диаметру. На рабочей поверхности возникают сколы, зазубрины, трещины.

У тракторов наиболее быстро изнашиваются детали двигателей, на срок службы которых оказывают влияние условия эксплуатации, в частности режимы его работы. Климатические условия и резкое различие режимов полевых работ приводит к резкому изменению температурного и нагрузочного режимов работы двигателя. В двигателях наиболее быстро изнашиваются канавки поршней, цилиндры, поршневые кольца, клапаны, шейки коленчатого вала, подшипники вала, посадочные гнезда корпусов подшипников и посадочные места на валу. Типичными высоконагруженными деталями, требующими увеличения износостойкости, являются валы. Конструктивная значимость деталей типа «вал» является определяющей в обеспечении работоспособности двигателей тракторов и другой сельскохозяйственной техники. Абразивные частицы и продукты изнашивания, попадая с маслом в подшипники вала, изнашивают его шейки. Шейки коленчатых валов, работающих в соединении с подшипниками, изнашиваются по диаметру. Коленчатые валы могут иметь следующие дефекты: овальность, конусность и повреждения шатунных и коренных шеек; износ посадочных мест под шарикоподшипники муфт сцепления, под шестерни и шкивы вентилятора; износ шпоночных канавок и др. Изнашивание шеек коленчатого вала определяет срок службы двигателя в целом.

Анализ статистических данных дефектов сельскохозяйственной техники показал, что износ и коррозия их деталей составляет 80...90%, а усталостное разрушение – 20...30% (рис. 2), что является главной причиной сравнительно низкого их ресурса и, как следствие, приводит к нарушению агротехнических требований и уменьшению урожайности.

Обобщая результаты исследований по дефектации деталей сельскохозяйственной техники, можно сделать вывод, что в большинстве случаев детали теряют свой ресурс и отказывают в результате изнашивания их рабочих поверхностей.

Наиболее перспективным методом повышения износостойкости малоресурсных деталей сельскохозяйственной (почвообрабатывающей, зерноуборочной, кормоуборочной, перерабатывающей и др.) техники является формирование



Рисунок 2 – Распределение видов дефектов сельскохозяйственной техники

на ее рабочих поверхностях износостойких слоев из наиболее доступных и низкостоимостных для покрытий материалов в сочетании с технологиями нанесения покрытий и их последующей обработки.

На основании анализа существующих методов нанесения покрытий, упрочнения и восстановления деталей сельскохозяйственной техники в условиях предприятий и мастерских агропромышленного комплекса выбрали газопламенное (ГПН) и электродуговое напыление (ЭДН) (табл. 2) [1]. Эти методы легко реализуются, просты и малозатратны, обладают технологической гибкостью применения к различным типоразмерам деталей. Их эффективность определяется следующими показателями: производительностью от 1 до 100 кг/ч; толщиной покрытий от сотых долей миллиметра до нескольких миллиметров; отсутствием деформации изделий при нанесении покрытия (температура нагрева изделия при напылении не превышает 150...200°C); простотой и мобильностью оборудования; возможностью нанесения покрытий на локальные участки и большие поверхности деталей. Покрытия, полученные ГПН и ЭДН, имеют пористую поверхность. Такие покрытия легко прирабатываются, сохраняют смазку, удовлетворяют основным свойствам антифрикционности (самосмазываемость, самопритираемость), поэтому работают в условиях ограниченной смазки, улучшают противозадирную стойкость пары трения [1].

Таблица 2 – Характеристика способов ГПН и ЭДН

Параметр	Способы газотермического напыления	
	ЭДН	ГПН
Производительность, кг/ч	3...31	1...10
Коэффициент использования материала	0,8...0,9	0,8...0,95
Температура нагрева детали, °С	100...150	100...150
Прочность сцепления, МПа	до 40	до 50
Пористость, %	10,0...30,0	16,0...35,0

При ГПН источником тепловой энергии является газовое пламя, образующееся в результате горения смеси «кислород (сжатый воздух) – горючий газ (ацетилен, пропан-бутан, природный газ и др.)». Метод ГПН находит применение: для формирования антифрикционных покрытий на сопрягаемых поверхностях корпусных опор; защиты от износа рабочих органов сельскохозяйственных машин (лемеха и долота плугов, лапы сеялок и культиваторов, ножи и противорежущие пластины кормоуборочных комбайнов); при восстановлении изношенных и упрочнении новых деталей тракторов; нанесении антикоррозионных покрытий [1].

В мировой практике упрочнения, восстановления и антикоррозионной защиты деталей метод ЭДН [1] получил значительное распространение как один из самых технологичных и производительных методов (см. табл. 2). Сущность процесса электродугового напыления заключается в нагреве (до плавления) электрической дугой сходящихся проволок и распылении расплавленного металла сжатым воздухом или газовым потоком. Методом ЭДН можно восстанавливать детали, обеспечивая их износостойкость на уровне новых деталей, и наносить покрытия, которые по качеству не уступают покрытиям, нанесенным плазменным и детонационным методами. Это обусловлено многими достоинствами метода: высокой тепловой эффективностью, достигающей 57%, по сравнению с 17% при плазменном напылении; распространенностью и доступностью источника энергии; отсутствием значительного термического влияния на деталь, деформация которой неизбежна при наплавке; низкой себестоимостью восстановления деталей (удельная себестоимость нанесения покрытия в 1,4...1,8 раза ниже, чем при наплавке); преимущество ЭДН перед наплавкой по трудоемкости (продолжительность наплавки 1 ч 10 мин, продолжительность ЭДН – 24 мин). Свойства ЭДН покрытий: износостойкость в 1,5...1,8 раза выше закаленной стали 45; стабильность усталостной прочности; способность работать длительное время без доступа смазки до момента схватывания. Электродуговое напыление используется для антикоррозионной защиты металлоконструкций, защитно-декоративных целей, создания антифрикционных покрытий, восстановления деталей цилиндрической и плоской формы, которые работают в условиях трения скольжения и смазки. Методом ЭДН наносят покрытия:

- 1) с повышенной износостойкостью и прочностью сцепления на поверхности деталей, которые работают при ударном нагружении, в условиях знакопеременных и высоких контактных нагрузок;
- 2) на крупногабаритные, тонкостенные и длинномерные детали, на которых невозможно оплавление покрытий из-за их большой массы или коробления в процессе оплавления [1].

Однако ЭДН- и ГПН-покрытия из сталей имеют максимально достигаемую твердость в пределах 35...50 HRC, из-за выгорания углерода в процессе напыления, что существенно снижает их износостойкость. Поэтому разработка эффективных способов изготовления деталей с ГПН- или ЭДН-покрытиями повышенной износостойкости выступает как *актуальная задача*.

Несмотря на большое количество разработок в области повышения твердости и износостойкости ГПН- и ЭДН-покрытий, в настоящее время исследования приобрели направленность на активирование процессов напыления и (или) их модифицирование (рис. 3) [2]. На практике реализуются следующие приемы активации процесса напыления: интенсификация процесса смешения рабочих газов; сообщение дополнительной энергии частицам напыляемого материала путем их нагрева, ускорения или того и другого одновременно; сообщение дополнительной энергии подложке путем ее предварительного нагрева; уменьшение среднего размера распыленных частиц; повышение активности поверхности частиц и подложки механическим (повышение шероховатости) или химическим (восстановление окислов) путем и т.п.; нанесение покрытий при внешнем воздействии (ультразвуковые колебания, электромагнитное поле и т.д.); последующая термообработка покрытия.



Рисунок 3 – Основные направления повышения износостойкости ГПН- и ЭДН-покрытий

Объединение нанесения покрытий с модификацией поверхности позволяет создать комбинированные методы инженерии поверхности (интегрированные технологии), преимуществами которых является высокий уровень физико-механических свойств и возможность модифицирования рабочей поверхности [3]. Как показывает отечественный и зарубежный опыт, восстановление-упрочнение деталей наиболее эффективно путем нанесения на рабочие поверхности защитных покрытий интегрированными технологиями. Модифицирование поверхности деталей, возможно, проводить как изменением структуры поверхностных слоев, так и изменением химического состава. К методам модифицирования относят различные способы нанесения покрытий и химико-термическую обработку или их комбинации. Повышают износостойкость и прочностные свойства электродуговых и газопламенных покрытий лазерной, ультразвуковой и другими методами обработки (см. рис. 3).

Таким образом, в данной работе предлагается решить проблему создания деталей сельскохозяйственной техники из низкоуглеродистых сталей с износостойкими покрытиями путем активирования процессов ГПН и (или) ЭДН сталей ферритного и мартенситного классов и их последующее модифицирование при помощи электроконтактной обработки (ЭКО). При этом используется подход, в основе которого лежит создание и целенаправленное управляемое использование деформационных структурно-фазовых превращений и метастабильных состояний, обеспечивающих комплексное улучшение физико-механических и эксплуатационных свойств покрытий, а следовательно и рабочих поверхностей деталей.

Цель исследований – установление влияния ЭКО на структурно-фазовые превращения в покрытиях, полученных ГПН и ЭДН, сталей мартенситного и ферритного классов во взаимосвязи с их физико-механическими свойствами для повышения износостойкости деталей сельскохозяйственной техники.

Результаты исследований. При активированном электродуговом напылении (АДН) в качестве распыляющего газа используются продукты сгорания пропано-воздушной смеси, что позволяет значительно снизить окисление напыляемого металла и выгорание легирующих элементов [2]. Так, количество углерода в покрытии, полученном из проволоки 40Х13, практически не отличается от его содержания в исходной проволоке. Коэффициент использования материала при АДН возрастает и достигает значения, равного 0,85. Сравнительный анализ свойств покрытий показал, что прочность сцепления покрытий, наносимых АДН, выше в 1,8...2,2 раза [2].

Применение рассмотренных выше методов увеличения прочности и износостойкости ГПН- и ЭДН-покрытий ограничено из-за ряда недостатков [3]. В частности, лазерная и электронно-лучевая обработка приводят к неоднородной макроструктуре поверхности. Химико-термическая обработка (ХТО) характеризуется большой продолжительностью процесса и не позволяет проводить обработку крупногабаритных изделий. При обработке необходимо стремиться к использованию способов с минимально необходимым нагревом (высокие температуры отрицательно сказываются на «объемных» свойствах упрочняемых деталей) и малыми величинами припусков на финишную обработку. Технологии, сочетающие методы формирования покрытий и последующее их модифицирование, позволяют повысить твердость и износостойкость ГПН- и ЭДН-покрытий.

Высокую износостойкость, твердость и прочие свойства ЭДН- и ГПН-покрытий можно обеспечить такими методами модифицирования, как механо-термическое упрочнение (МТУ). Значительное повышение износостойкости после механотермической упрочняющей обработки (МТУО) объясняется положительной стороной механического фактора – взаимодействие материалов в твердой фазе активируется не только температурой, но и давлением. Наибольшее распространение среди МТУО получила схема электроконтактного нагрева при прокатке покрытий роликом [3]. При этом максимальная износостойкость может быть достигнута при условиях, обеспечивающих наибольшую дисперсность и микроскажения кристаллической структуры. Структура покрытия зависит от температурно-силовых параметров МТУО [3].

Электроконтактная обработка обеспечивает при сохранении исходных «объемных» механических свойств деталей упрочняющий эффект и позволяет: заменить высоколегированные дефицитные материалы для покрытий на менее затратные; снизить требования к механическим свойствам напыляемого материала; заменить финишную механическую обработку на поверхностное пластическое деформирование (ППД) до требуемых размеров детали и чистоты поверхности; заменить традиционную наплавку с ее трещинами и необходимостью финишной механической обработки при обеспечении толщин покрытий $h > 3$ мм с высокой адгезионной прочностью и низким уровнем остаточных напряжений [3].

Электроконтактная обработка осуществляется под давлением при прямом пропускании электрического тока (рис. 4), ее достоинствами являются: высокая производительность; низкая энергоемкость; отсутствие светового излучения и газовой выделения; исключена необходимость в защитных средах; минимальные тепловложения.

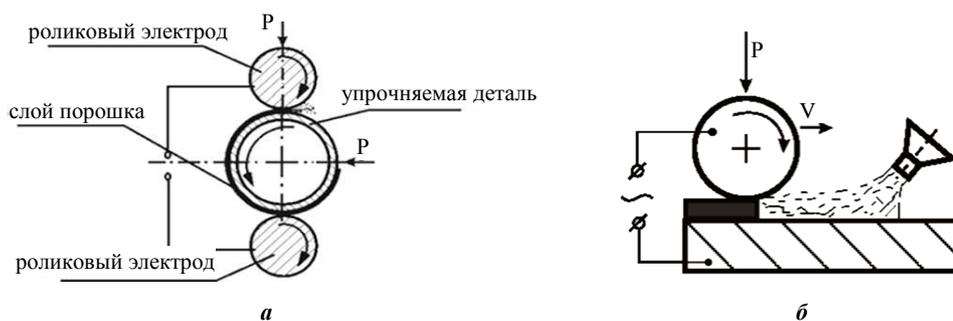


Рисунок 4 – Технологическая схема электроконтактной обработки (а) и схема ЭКО газопламенных и электродуговых покрытий (б)

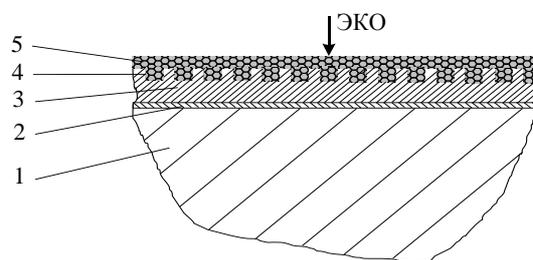
Зона термического влияния (ЗТВ) при воздействии электрического тока на деталь составляет 0,2...1,0 мм вследствие малой длительности нагрева. Отсутствие жидкой фазы в зоне нанесения покрытия повышает долговечность электрода, снижает потери материала покрытия, позволяет увеличить толщину износостойкого слоя в 3...6 раз при минимальном уровне остаточных напряжений и прочности сцепления более 200 МПа. Пористость покрытий не превышает 5%. Высокое качество покрытий с использованием ЭКО обеспечивается импульсным характером процесса. Импульсные методы характеризуются большими энергетическими возможностями и экономичностью [4]. Электроконтактная обработка позволяет осуществлять финишную обработку ЭДН- и ГПН-покрытий до требуемого размера и чистоты поверхности без припусков или при значительном их уменьшении. Использование комбинации ГПН/ЭДН и последующей ЭКО открывает широкие возможности в создании износостойких покрытий [5; 6].

При проектировании комбинированной технологии создания покрытий ГПН/ЭДН+ЭКО целесообразно использовать подход, в основе которого лежит создание и целенаправленное управляемое использование деформационных структурно-фазовых превращений и метастабильных состояний, обеспечивающих комплексное улучшение их физико-механических и эксплуатационных свойств. Главной особенностью этого подхода является способность материалов покрытий к определенным фазовым превращениям и структурным изменениям при их нанесении и упрочняющей обработке [7]. В качестве таких материалов для износостойких покрытий было предложено использовать наиболее доступные и низкозатратные стали мартенситного и ферритного классов (табл. 3), главной особенностью которых является способность к структурно-фазовым превращениям при термомеханическом воздействии.

Таблица 3 – Проволочные стали мартенситного (40X13) и ферритного (Св-08) классов

Марка материала	Концентрация элементов, % мас.							Твердость после напыления, HV
	C	Cr	Ni	Ti	Mn	Si	Fe	
40X13	0,42	13,4	0,54	0,13	0,44	0,27	основа	360...420
Св08	0,06	0,1	–	–	0,40	0,25	основа	250...300

При термомеханическом воздействии в этих сталях происходит аустенитно-мартенситное превращение, которое влияет на твердость, сопротивление деформации и износостойкость. Процесс превращения аустенита в мартенсит деформации и сопутствующие этому явления поглощают большое количество энергии. Возрастание способности металла к поглощению энергии приводит к повышению сопротивляемости изнашиванию. Мартенсит, возникающий при деформации аустенита под действием приложенных извне напряжений обладает повышенной прочностью. Интенсивность упрочнения пропорциональна количеству мартенсита деформации, зависящему от степени пластической деформации в контакте и температуры, при которой происходит деформирование. В мартенсите деформации образуются сегрегации углерода такого же типа, как и при старении, что должно приводить к дополнительному упрочнению. В результате пластической деформации стали при температурах мартенситного превращения количество мартенсита увеличивается. Образование того или иного структурного типа мартенсита обусловлено температурой его формирования, которая зависит от состава сплава и других факторов. Мартенситную структуру получают при быстром охлаждении системы «Fe – C», находящейся в области аустенитного или аустенитно-ферритного состояния. Вследствие аустенитно-мартенситного превращения в структуре стали наряду с мартенситом присутствует и остаточный аустенит. При термомеханическом воздействии пластически деформированный аустенит находится в метастабильном состоянии и характеризуется изменением многих его параметров: увеличением сопротивления деформации, структурными превращениями, искажением кристаллической решетки и т.п. Поэтому максимальная износостойкость достигается в случаях, когда в структуре сплавов содержится метастабильный аустенит, способный к деформационным превращениям. Значительная износостойкость сплавов, в структуре которых содержится метастабильный аустенит, объясняется его высокой способностью к наклепу, легированностью, особенностями строения кристаллической решетки, в которой затруднено слияние линейных дислокаций в плоскостные с образованием зародышевых трещин, представляющих начальную стадию разрушения.



1 – основа (сталь Ст 3); 2 – подслои (сталь Х20Н80); 3 – пористое ГПН/ЭДН покрытие (40X13/Св08); 4 – поры в поверхностном слое напыленного покрытия 3; 5 – углеродсодержащая обманка

Рисунок 5 – Схема износостойкого покрытия

В результате проведенных исследований разработаны схема и способ создания износостойких стальных покрытий, включающие ГПН- и ЭДН-покрытия и их ЭКО. Схема получения износостойкого покрытия (рис. 5) представлена в виде технологической цепочки методов их нанесения и обработки с указанием значений основных технологических параметров этих методов (табл. 4).

Выявлено, что режимы электроконтактной обработки покрытий из сталей мартенситного и ферритного классов значительно отличаются. Покрытия, полученные газопламенным и электродуговым напылением сталей ферритного класса (Св-08), допускают более «жесткую» ЭКО. Покрытия, полученные газопламенным и электродуговым напылением сталей мартенситного класса (40X13), требуют более «мягких» режимов ЭКО.

При разработке способа использовали подход, в основе которого лежат структурно-фазовые превращения при ЭДН/ГПН и при ЭКО напыленных слоев, которые обеспечивают повышение износостойкости покрытий. В результате исследований установлена взаимосвязь физико-механических свойств стальных покрытий со структурно-фазовыми превращениями в них; обнаружено, что уровень этих свойств, кон-

тролируемый степенью насыщения мартенситной фазы углеродом, повышается с увеличением содержания углерода и карбидных включений в сталях, а также при насыщении покрытия углеродсодержащими модификаторами (коллоидным графитом, ультрадисперсным алмазо-графитовым порошком (УДАГ)); выявлено, что ЭКО стальных покрытий снижает их пористость, увеличивает содержание оксидов в поверхностном слое, уменьшает концентрацию остаточного аустенита (вследствие разогрева поверхности до 1200 °С) в результате $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращений и позволяет осуществлять модифицирование. Достоверность полученных результатов была подтверждена результатами исследований фазового состава покрытий, микроструктуры ГПН- и ЭДН-покрытий их проволочных сталей 40X13 и Св08 в исходном состоянии и после их ЭКО (табл. 5).

Таблица 4 – Методы и режимы формирования износостойких покрытий

Метод	Режимы			
	Тип покрытия	Горючая смесь	Расстояние, мм	Толщина слоя, мм
Газотермическое напыление (нанесение покрытия)	40X13	Ацетилен + кислород	150,0	1,0...1,2
Электрохимическая полировка (вскрытие пор)	Состав электролита	Температура электролита, °С	Плотность тока J , А/см ²	Время, мин
	H ₃ PO ₄ (760 г) + CrO ₃ (100 г)	40...50	0,5	10,0
Ультразвуковая обработка	Тип модификатора	Частота колебания, Гц	Время, мин	Среда обработки
	Порошок УДАГ 0,5% об.	44,0	7,0...8,0	Спирт этиловый C ₂ H ₅ OH
Электроконтактная обработка (как с углеродными модификаторами, так и без них)	Ток нагрева, I , кА	Давление, P , МПа	Время нагрева, T_n , с	Время импульсов-пауз, t , с
	3,5	20,0	8-10	0,02...0,04

Таблица 5 – Фазовый состав покрытий из проволочной стали Св-08 и 40X13

Материал покрытия	Метод нанесения покрытия	Фазовый состав			
		Исходное	+ ЭКО	+ ЭКО + С	+ ЭКО + УДАГ
Св-08	ЭДН	α -Fe; FeO; Fe ₃ O ₄	α -Fe; FeO; Fe ₃ O ₄	α -Fe; FeO; Fe ₃ O ₄	α -Fe; FeO; Fe ₃ O ₄
Св-08	ГПН	α -Fe; FeO	–	–	α -Fe; FeO; Fe ₃ C; γ -Fe
40X13	ЭДН	α -Fe; FeO; Fe ₃ O ₄ ; γ -Fe	α -Fe; FeO; Fe ₃ O ₄ ; γ -Fe	α -Fe; FeO; Fe ₃ O ₄ ; γ -Fe	α -Fe; FeO; γ -Fe
40X13	ГПН	α -Fe; γ -Fe; FeO; Fe ₃ O ₄	–	–	α -Fe; γ -Fe; FeO; Fe ₃ O ₄

Для исследования фазовых и структурных превращений в напыленных слоях при ЭКО (см. табл. 5) использовался рентгеноструктурный анализ (дифрактометр ДРОН-3.0, монохроматизированное CoK _{α} -излучение, $V = 30$ кВ, $I = 10$ мА). В качестве модификаторов использовался коллоидный графит и ультрадисперсная алмазо-графитная смесь УДАГ-СП (ТУ РБ 28619110.001-95). Ультрадисперсная алмазосодержащая шихта состоит из алмазной и графитоподобной фаз со средним размером углеродных кластеров 10...30 нм. Соотношение интенсивностей дифракционных линий $\langle 111 \rangle$ алмаза и $\langle 002 \rangle$ графита позволяет оценить соотношение объемных долей алмазной и графитоподобной фаз как 30:70.

С фазовыми превращениями, протекающими в слое при напылении, связан характер распределения микротвердости по глубине покрытия. При этом необходимо иметь в виду, что первые порции напыляемых капель расплавленной стали 40X13 падают на холодную поверхность подложки и быстро охлаждаются, что приводит к реализации в них мартенситного превращения. Напыление следующих порций расплавленных капель стали 40X13 сопровождается повторным разогревом ранее закристаллизованного покрытия и протеканием в нем процессов самоотпуска, приводящего к снижению твердости прилегающего к подложке напыленного слоя. В то же время в самом свеженапыленном слое вследствие замедленной скорости его охлаждения на разогретой до 250...300 °С ранее закристаллизованной поверхности сохраняется повышенное количество остаточного аустенита [1]. При этом стабилизация остаточного аустенита в поверхностных слоях покрытия связана с его изотермической выдержкой в области повышенной устойчивости аустенита при охлаждении [2].

Выводы. Итогом проведенных исследований выступают следующие результаты:

- предложен новый подход к получению газотермических стальных покрытий на низколегированных сталях с повышенной износостойкостью, в основе которого лежит создание и целенаправленное управляемое использование деформационных структурно-фазовых $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращений и метастабильных состояний путем температурно-силового воздействия при их электроконтактной обработке;

- представлена оригинальная схема и способ конструирования стальных покрытий, которые включают газотермическое нанесение металлического подслоя для обеспечения адгезии, нанесение стального износостойкого покрытия методом ГПН/ЭДН с последующей ЭКО;

- установлена взаимосвязь физико-механических свойств стальных покрытий со структурно-фазовыми $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращениями в них и показано, что уровень этих свойств, контролируемый степенью насыщения мартенситной α -фазы углеродом, увеличивается с увеличением содержания углерода и карбидных включений в сталях;

- разработаны практические рекомендации для создания износостойких покрытий из сталей мартенситного и ферритного классов для восстановления и упрочнения деталей сельскохозяйственной техники.

На рисунке 6 представлены детали с износостойкими покрытиями.



Рисунок 6 – Ножи с покрытиями свеклоуборочных машин (а, б) и измельчительного барабана (в, г) комбайна

ЛИТЕРАТУРА

1. Структура и свойства покрытий из стали 40X13, полученных с использованием различных методов газотермического напыления / П.А. Витязь [и др.] // Физическая мезомеханика. – 2002. – Т. 5. – № 1. – С. 15–22.
2. Белоцерковский, М.А. Структурные аномалии в стальных газотермических покрытиях и возможности их использования / М.А. Белоцерковский // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2008. – № 10. – С. 39–44.
3. Корж, В.Н. Комбинированные методы инженерии поверхности / В.Н. Корж, Т.В. Ворона, А.В. Лопата // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: матер. 4-ї междунар. наук.-практ. конф., Чернігів, 19–21 травня 2014 р. – Чернігів: ЧНТУ, 2014. – С. 159–163.
4. Черновол, М.И. Повышение износостойкости газотермических покрытий из железоуглеродистых сплавов электроконтактной обработкой / М.И. Черновол, Т.В. Ворона, Л.А. Лопата // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузове машинобудування, автоматизація: зб. наук. праць Кіровоградського нац. техн. ун-ту / КНТУ. – Кіровоград. – 2015. – Вип. 28. – С. 230–236.
5. Получение износостойких напыленных покрытий / М.И. Черновол [и др.] // Инженерия поверхности и реновация изделий: материалы 14-й междунар. науч.-техн. конф., Савлява, 2–6 июня 2014 г. – Киев: АТМ України. – С. 149–151.
6. Способ получения износостойких покрытий / М.И. Черновол [и др.] // Инженер-механик: республ. межотрасл. Производств.-практ. журнал. – 2015. – № 2 (67). – С. 38–39.
7. Структурно-фазовые превращения в газотермических стальных покрытиях в процессе их напыления и последующей электроконтактной обработки / М.И. Черновол [и др.] // Проблема тертя та зношування: наук.-техн. журнал. – Київ, НАУ, 2015. – № 2(67). – С. 99–109.

Поступила 20.12.2015

STRUCTURAL AND PHASE TRANSFORMATIONS AND MODIFYING IN ELECTROCONTACT TREATMENT GAS-THERMAL OF STEEL COATING

M. CHERNOVOL, T. VORONA, O. SHTEMPEL, L. LOPATA

The results of the analysis of statistical data durability and wear resistance of details of agricultural machinery. It is shown that the wear, corrosion and fatigue failure of parts are the main cause of their exit from the building, and as a result – a violation of agro-technical requirements and reducing yields. This paper proposes a method of creating parts with a wear-resistant coating, which combines gas-flame, and (or) electric arc spraying steels ferritic and martensitic grades, and the subsequent modification of sprayed coatings electrocontact treatment.

Keywords: integrated technology, integrated or combined methods for hardfacing, hybrid technology, electric arc spraying, electric-spark doping, ion.