

УДК 621.793.620.172

М.И. Черновол, проф., д-р техн. наук, Т.В. Ворона, асп.

Кировоградский национальный технический университет, krakazyblik@ukr.net

Е.Е. Кожевникова, ст. препод.

Одесская национальная морская академия, lenak2001@ukr.net

Л.А. Лопата, канд. техн. наук

Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, beryuza@ukr.net

Повышение износостойкости газотермических покрытий из железо-углеродистых сплавов электроконтактной обработкой

Предложен способ повышения износостойкости газотермических покрытий из железо-углеродистых сплавов электроконтактной обработкой (ЭКО). В основе способа лежит создание и использование фазово-структурных деформационных превращений, которые обеспечивают повышение износостойкости напыленных покрытий и комплексное улучшение их физико-механических и эксплуатационных свойств. Использование комбинации технологии напыления недорогих сталей и их ЭКО открывает широкие возможности в создании износостойких покрытий.

электроконтактная обработка, газопламенное напыление, электродуговое напыление, стали мартенситного и ферритного классов, структурно-фазовые деформационные превращения, железо-углеродистые сплавы

М.І. Черновол, проф., д-р техн. наук, Т. В. Ворона, асп.

Кіровоградський національний технічний університет

О.Е. Кожевникова, ст. викл.

Одеська національна морська академія

Л.А. Лопата, канд. техн. наук

Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренко НАН України

Підвищення зносостійкості газотермічних покриттів з залізо-вуглецевих сплавів електроконтактною обробкою

Запропоновано спосіб підвищення зносостійкості газотермічних покриттів з залізо-вуглецевих сплавів електроконтактною обробкою (ЕКО). В основі методу лежить створення і використання фазово-структурних деформаційних перетворень, які забезпечують підвищення зносостійкості напылених покриттів і комплексне поліпшення їх фізико-механічних та експлуатаційних властивостей. В результаті ЕКО ГПН / ЕДН покриттів із сталей мартенситного і феритного класів у покриттях формується двофазна структура, що містить метастабільний аустеніт, що має твердість 200 - 300 HV, а також певну кількість оксидів. При цьому, в процесі подальшої експлуатації деталей з цими покриттями внаслідок інтенсивної пластичної деформації метастабільний аустеніт буде трансформуватися в зносостійкий і твердий мартенсит (HV = 700 ... 800) за рахунок протікання деформаційного γ - α перетворення. Використання комбінації технології

электроконтактна обробка, газополуменеве напылення, электродуговое напылення, стали мартенситного і феритного класів, структурно-фазові деформаційні перетворення, залізо-вуглецевих сплави

Постановка проблемы. Методы газопламенного и электродугового напыления не обеспечивают требуемого уровня физико-механических свойств получаемых покрытий, в частности необходимые значения твердости, плотности, прочности сцепления и износостойкости покрытий. При реализации методов распыления

© М. И. Черновол, Т.В. Ворона, Е.Е. Кожевникова, Л.А. Лопата, 2015

проволочных сталей максимальная достигаемая твердость покрытий находится в пределах 35-50 HRCэ, что существенно снижает их износостойкость и резко ограничивает область применения [1, 2].

Анализ последних исследований и публикаций. В настоящее время известен ряд методов увеличения износостойкости поверхностных слоев напыленных металлических материалов [3-6], однако их применимость ограничена. В частности, лазерная и электронно-лучевая обработка приводят к неоднородной гетерогенной макроструктуре поверхности и не обеспечивают ее химического модифицирования [4]. Методы высокоэнергетической ионной имплантации существенно увеличивают себестоимость покрытий [3]. Химико-термическая обработка характеризуется большой продолжительностью процесса и не позволяет проводить обработку крупногабаритных изделий [5-6].

Постановка задачи. Повышения износостойкости напыленных покрытий из сталей ферритного и мартенситного классов газопламенным и электродуговым методами.

Изложение основного материала. Возможными путями решения задачи повышения износостойкости ГПН/ЭДН покрытий из железо-углеродистых сплавов является формирование в них высокопрочных поверхностных слоев с градиентной структурой посредством активирования процессов напыления и последующего модифицирования напыленных слоев. Высокую износостойкость, твердость и прочие свойства покрытий, полученных газопламенным и электродуговым напылением можно обеспечить такими методами модифицирования, как термомеханическое упрочнение. Использование комбинации технологии напыления и последующего термомеханического упрочнения открывает широкие возможности в создании износостойких покрытий. Управляя процессами структурообразования при высокоэнергетическом воздействии можно конструировать градиентные слои с требуемым комплексом эксплуатационных свойств. Объединение нанесения покрытий с модификацией поверхности и обработкой покрытий позволяет создать комбинированные методы инженерии поверхности. Комбинирование технологий инженерии градиентных слоев с широко известными традиционными способами напыления является перспективным направлением в области упрочнения и восстановления деталей машин.

Таким образом, активирование процесса напыления и последующее модифицирование поверхностных слоев термомеханическим упрочнением позволяют путем управления структурно-фазовыми превращениями ГПН/ЭДН покрытий из железо-углеродистых сплавов формировать в них высокопрочные поверхностные слои с градиентной структурой и являются эффективным путем решения задачи повышения износостойкости напыленных покрытий.

Разработка способа повышения износостойкости ГПН/ЭДН покрытий из железо-углеродистых сплавов. В основе способа ГПН/ЭДН покрытий из железо-углеродистых сплавов лежит создание и использование фазово-структурных деформационных превращений, которые обеспечивают повышение износостойкости напыленных покрытий и комплексное улучшение их физико-механических и эксплуатационных свойств.

Наиболее целесообразно высокую твердость и износостойкость напыленных покрытий из сплавов на основе железа обеспечивать таким механотермическим методом как электроконтактная обработка (ЭКО). Использование комбинации технологии напыления недорогих сталей и последующей их ЭКО, открывает широкие возможности в создании износостойких покрытий. Объединение нанесения покрытий

ГПН/ЭДН напылением с модификацией поверхности и обработкой покрытий ЭКО позволяет создать новый комбинированный метод инженерии поверхности.

В основе способа повышения износостойкости ГПН/ЭДН покрытий из железом углеродистых сталей мартенситного и ферритного классов лежит их обработка электроконтактным методом, в результате которой в покрытиях из этих сталей формируется двухфазная структура, содержащая метастабильный аустенит, имеющий твердость 200 - 300 HV, а также определенного количества оксидов. При этом, в процессе дальнейшей эксплуатации деталей с этими покрытиями (приработки) вследствие интенсивной пластической деформации метастабильный аустенит будет трансформироваться в износостойкий и твердый мартенсит ($HV=700...800$) за счет протекания деформационного γ - α превращения.

Таким образом, получить износостойкие покрытия из сталей мартенситного и ферритного классов можно способом, который заключается в сочетании газопламенного напыления (ГПН)/электродугового напыления (ЭДН) покрытий с их электроконтактной обработкой (ЭКО). В основе этого способа лежит влияние электроконтактной обработки (ЭКО) на структурно - фазовые γ - α превращения в ГПН/ЭДН стальных покрытиях.

Прогнозирование появления возможных структурных особенностей и физико-механических свойств модифицированных электроконтактной обработкой газотермических покрытий на основании данных, полученных при электроконтактной обработке свободно насыпанных порошков или сформованных клеевым методом слоев невозможно, что связано со следующими особенностями напыленных покрытий:

- сверхбыстрая кристаллизация напыленных капель расплава приводит к высокой концентрации дефектов кристаллической решетки (дислокаций, вакансий) в частицах покрытия;

- частицы покрытия имеют строение, отражающее условие гетерогенной кристаллизации с развитием фронта растущих кристаллов в направлении, противоположном отводу тепла, т.е. перпендикулярно к поверхности формирования слоя;

- напыленное покрытие имеет поры и разветвленную сеть границ;

- при напылении покрытий происходит интенсивное взаимодействие входящих в их состав элементов с окружающей средой и рабочими газами, в частности, кислородом, что приводит к существенному изменению фазового состава и свойств покрытий.

Несмотря на указанные особенности можно ожидать, что произойдут следующие изменения структуры. В результате электроконтактной обработки напыленных покрытий из проволок сталей 40X13 (мартенситного класса) и Св-08 (ферритного класса) в поверхностных слоях возможно образование модифицированных градиентных структур, содержащих высокопрочную матричную α -фазу (твердый раствор углерода в α -Fe), а также включения карбидов и аустенита. При этом присутствие в модифицированном слое повышенных количеств аустенита может способствовать повышению вязкости разрушения и абразивной стойкости покрытия [], а наличие в слое высокопрочных фаз (мартенсит и карбиды) должно обеспечить повышенную прочность, а также износостойкость напыленных покрытий. Кроме этого термосиловое воздействие в области повышенных температур может уменьшать пористость покрытия и увеличивать его адгезионную прочность [7].

В качестве объектов исследования были выбраны покрытия из проволочных сталей 40X13 (сталь мартенситного класса) и Св-08 (сталь ферритного класса), напыляемые газопламенным и электродуговым методами. Стали мартенситного

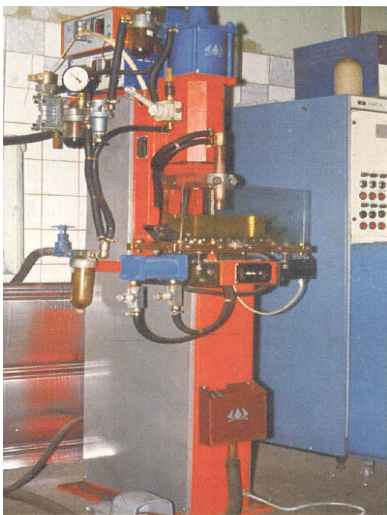
(40X13) и ферритного (Св-08) классов наиболее перспективны, что обусловлено особенностями структурно-фазовых превращений в них при термомеханическом воздействии. Главная особенность выбранных сталей ферритного и мартенситного классов в качестве материала покрытий - способность к фазовым превращениям и структурным изменениям как на стадии нанесения покрытий и упрочняющих обработок, так и на стадии эксплуатации, что позволит повысить износостойкость рабочих поверхностей деталей. Диаметр проволоки $\varnothing 2,0$ мм. Химический состав проволок приведен в табл. 1.

Таблица 1 – Химический состав распыляемых проволок

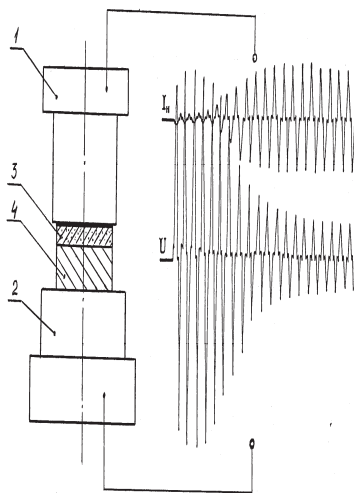
Марка Материала	Концентрация элементов, мас. %						
	C	Cr	Ni	Ti	Mn	Si	Fe
40X13	0,42	13,4	0,54	0,13	0,44	0,27	основа
Св08	0,06	0,1	–	–	0,40	0,25	основа

Материал подложки – сталь Ст.3. Промежуточный слой сформирован распылением проволоки из сплава Х20Н80. Температура распыляющего факела не превышала 3000 К. Скорость полета напыляемых частиц составляла: 100...130 м/с (ГПН покрытие) и 400÷500 м/с (ЭДН покрытие). Размеры частиц, из которых формировались покрытия, находились в пределах 5÷40 мкм. Толщина покрытия составляла 0,25...0,8 мм.

Электроконтактная обработка напыленных покрытий осуществлялась на установке для электроконтактного спекания порошковых материалов (рис.1). Регулируемыми параметрами технологического процесса электроконтактной обработки (ЭКО) являются ток, его длительность и усилия сжатия электродов. Эти параметры изменяются по заданной программе, зависящей от геометрических параметров слоя, свойств применяемых материалов и ряда других факторов. Отработка технологических параметров ЭКО проводилась на базе установки УЭКС-2 (рис. 1,а) с модернизированным блоком управления РКС-801М по схеме представленной на рис.1,б.



а



б



в

1, 2 – электроды; 3 напыленное покрытие 4 – основа

Рисунок 1 – Внешний вид установки УЭКС-2 (а), схема электроконтактной обработки напыленных покрытий (б) и образцы, закрепленные в приспособлении для напыления

Цилиндрические образцы ($\varnothing 10$ мм и высотой 8 мм) изготавливались из стали Ст.3 и на их торцевые поверхности напылялись слои из проволоочных сталей 40X13 и Св-08 (рис. 1,в). Образцы с напыленным покрытием помещались между двумя электродами - пуансонами, коммутированными с измерительным комплексом приборов (рис.1). Упрочняемые образцы обжимали электродами, проводящими ток плотностью 300 А/мм^2 со стороны подложки и со стороны покрытия. Давление на электрод регулировали, варьируя среднее контактное давление от 10 до 60 МПа. Длительность контакта электрода с поверхностью изменяли от 2 до 8 с. Электроконтактную обработку всех образцов на установке УЭС-2 (рис.1.а) осуществляли при следующих режимах: давление $P=40\text{МПа}$; ток $I = 5,6\text{кА}$; вторичное напряжение $U = 3,2 \text{ В}$; плотность тока $j = 2,5 \text{ кА/см}^2$; время нагрева $t = 10 \text{ сек.}$; охлаждение – на воздухе.

Интенсификация температурно-силовых параметров при электроконтактной обработке ускоряет спекание и, следовательно, увеличивает производительность процесса. Изменение времени, которое необходимо для электроконтактной обработки (ЭКО) покрытия, в зависимости от среднего контактного давления, показано на рис. 2.

Режимы термомеханического воздействия на композит (длительность контакта с электродом и давление на него) следует регулировать так, чтобы покрытие спекалось с подложкой без расплавления. При расплавлении существенно ухудшается качество покрытия. Наблюдаются локальное расплавление поверхностного слоя с выплесками металла, прилипание к электроду и отрыв от подложки. При прохождении электрического тока через систему покрытие-основа основное тепловыделение происходит в точках наибольшего электросопротивления, а именно: в местах взаимного контакта напыленных частиц, на участках, где покрытие прилегает к подложке. Это тепловыделение вызывает сваривание частиц друг с другом и с подложкой. Существенное влияние на свойства упрочняемых деталей при ЭКО оказывает зона термического влияния, ее глубина и строение (рис. 2.а). В процессе ЭКО вследствие термо-механического воздействия покрытие испытывает фазовые превращения: перлит (П) в зоне термического влияния превращается в аустенит (А), который, в свою очередь, при ускоренном нагреве в результате интенсивного теплоотвода при охлаждении испытывает мартенситное (М) превращение. Наиболее существенно структура основы изменяется в результате обработки покрытия при контактном давлении $\sim 40 \text{ МПа}$. В этом случае малоуглеродистая сталь (Ст. 3) в переходной зоне имеет структуру псевдоперлита, образование которого связано с нагревом основы до аустенитного состояния и последующим ускоренным охлаждением. При превышении величины контактного давления (давления электроконтактной обработки) 40 МПа , глубина зоны термического влияния вновь уменьшается. Структурные изменения в основе (образце, сталь Ст.3) ограничиваются рекристаллизацией феррита. Меньшее влияние термического цикла при увеличении силового воздействия объясняется сокращением времени, требуемого для полной обработки покрытия. Длительность цикла электроконтактной (термосиловой) обработки около 1 с оказывается в этом случае недостаточной для фазовых превращений в основе. Что касается качества покрытия, то увеличение силовых параметров ухудшает его: в покрытии возникают и не успевают завариваться хрупкие трещины. Малое термическое влияние при силовом воздействии 20 МПа обусловлено перераспределением тепловыделения в сторону пор и границ между несплошностями покрытия. При повышении давления площадь электрических контактов между частицами увеличивается, электросопротивление покрытия снижается, тепловыделение в основе возрастает. Режим ЭКО считается оптимальным, при котором покрытие формируется в процессе термосиловой обработки, а подложка

получает феррито-мартенситную структуру. В этом случае нет хрупкой переходной зоны, характерной для других способов обработки (печного, газовой горелкой, плазменной струей и другими неконцентрированными источниками тепла). Образование участков двойникового мартенсита в малоуглеродистой стали Ст.3 после охлаждения переходной зоны обусловлено тем, что принятый режим быстрого электроконтактного нагрева обеспечивает аустенитное превращение только в перлитных участках основы. В образовавшемся аустените содержится около 0,8% углерода, то есть столько же, сколько было в перлите. При последующем ускоренном охлаждении аустенит претерпевает мартенситное превращение. При повышении содержания углерода в мартенсите износостойкость повышается. Повышение содержания углерода в стали в этом случае является показателем увеличения количества карбидной фазы. Износостойкость ферритной матрицы (сталь Св-08) существенно ниже, чем мартенситной (сталь 40X13). Увеличение количества карбидов более эффективно влияет на износостойкость. На рис. 2 представлена зависимость интенсивности изнашивания (отношение массы потерь металла ΔI к массе абразива Q , вызвавшего это изнашивание) покрытий в зависимости от содержания в них углерода.

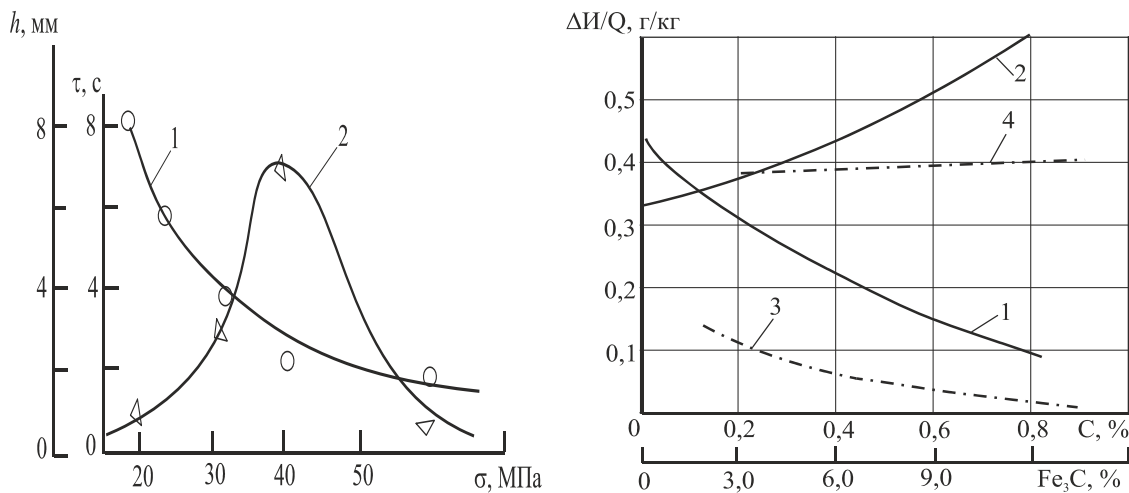


Рисунок 2 – Влияние давления при электроконтактной обработке (а) на длительность процесса (1) и глубину зоны термического влияния (2), и содержания углерода в покрытиях из сталей ферритного (Св-08) и мартенситного (40X13) классов на интенсивность изнашивания $\Delta I/Q$ (1, 2 – покрытие из Св-08 в скользящем и ударном потоке; 3, 4 – покрытие из 40X13 в скользящем и ударном потоке)

На основании исследований было установлено, что в результате электроконтактной обработки напыленных покрытий в поверхностных слоях образуются модифицированные градиентные структуры, содержащих высокопрочную матричную α -фазу (твёрдый раствор углерода в α -Fe), а также включения карбидов и аустенита. При этом присутствие в модифицированном слое повышенных количеств аустенита может способствовать повышению вязкости разрушения и абразивной стойкости покрытия, а наличие в слое высокопрочных фаз (мартенсит и карбиды) обеспечивает повышенную прочность, а также износостойкость газотермических покрытий. Кроме этого термосиловое воздействие в процессе электроконтактной обработки напыленных покрытий в области повышенных температур уменьшает пористость покрытия, и увеличивать его адгезионную стойкость. Для исследования фазовых и структурных превращений в напыленных слоях после ЭКО использовался рентгеноструктурный анализ (дифрактометр ДРОН-3.0, монохроматизированное $CoK\alpha$ излучение, $V=30$ кВ, $I=10$ мА). Для фазового анализа использовалась стандартная

картотека PDF. Твердость по Виккерсу определялась при нагрузке 49 Н, микротвердость измерялась при нагрузке 1 Н с выдержкой в течение 10 сек. Металлографические исследования проводились на оптическом микроскопе.

Выводы. Таким образом, для повышения износостойкости напыленных покрытий из сталей ферритного и мартенситного классов целесообразно использовать электроконтактный метод. Метод ЭКО отличается оптимальным воздействием на металл основы, достаточно технологичен, гарантирует высокую производительность, культуру производства и экологическую чистоту, сохранение наследственной структуры материала покрытия, обеспечивает его высокую износостойкость. Определены и отработаны режимы электроконтактной обработки напыленных покрытий. Показано, что ЭКО позволяет не только повышать износостойкость но и свести к минимуму их механическую обработку, обеспечивает получение однородной структуры покрытий.

Список литературы

1. Теория и практика газопламенного напыления / П.А. Витязь, В.С. Ивашко, Е.Д. Манойло и др. – Минск: Навука і тэхніка, 1993. – 295 с.
2. Буйкус Кястас Вито. Восстановление деталей автомобилей, тракторов и сельскохозяйственных машин активированной дуговой металлизации. Дис. канд. техн. наук. - Минск., 1998.
3. Витязь П.А.Ю Азизов Р.О., Белоцерковский М.А. Упрочнение газотермических покрытий. – Мн.: Бестпринт, 2004. – 192 с.
4. Улучшение напыленных покрытий посредством высоковольтного электронно-лучевого оплавления. Improvement of sprayed coatings with ultra high voltage EB melting / Tomie michio, Abf Nobuyuki, Morimoto Junij, Yamaguchi Akio, Arata Yoshiaki // Trans. JWRI. – 1992. – 21, № 2. – С. 229-300.
5. Корчагин И. Б. Технологии повышения износостойкости и восстановления деталей с использованием источников высокотемпературного нагрева: Учебное пособие Воронеж: Изд-во ВГТУ 2005. - 147 с.
6. 191. Соколов Ю.В., Садова М.А., Попок Д.А. Термическая обработка напыленных покрытий / Вестн. Беларус. нац. техн. ун-та. – 2004. - № 3. - С. 40-41
7. Ярошевич В.К., Генкин Я.С., Верещагин В.А. Электроконтактное упрочнение. – Минск: Наука и техника, 1982, - 256 с. Резник Н.Е. Взаимодействие лезвия с материалом в процессе его резания и износ лезвий / Н.Е. Резник // Повышение износостойкости и долговечности режущих элементов сельскохозяйственных машин. – Мн., ИНТИП, 1967. – 5-10 с.

Mykhailo Chernovol, Tetiana Vorona

Kirovohrad National Technical University

Olena Kozhevnikova

Odessa National Maritime Academy

Larysa Lopata

H.S. Pysarenko Institute for Problems of Strength NAS of Ukraine

Increase in wear resistance of gas-thermal coatings from iron-carbon alloys using electric contact treatment

A method for an increase in the wear resistance of iron-carbon alloy coatings using electric contact treatment is proposed, which is based on the initiation and use of phase-structural deformation transformations, which provide an increase in the wear resistance of deposited coatings and complex improvement of their physical-mechanical and performance properties.

As a result, in coatings from steels of martensite and ferrite types a two-phase structure has been formed, which contained a metastable austenite with a hardness of 200-300 HV along with some amount of oxides. In the course of operation of parts with such coatings, thanks to intense plastic deformation, the metastable austenite tends to transform into wear-resistant and hard martensite (HV=700...800) due to the $\gamma - \alpha$ deformation transformation.

electric contact treatment, flame spraying, electric arc spraying, martensite and ferrite steels, structure-phase deformation transformations, iron-carbon steels

Одержано 12.05.15