

УДК 621.793.620.172

М. И. ЧЕРНОВОЛ¹, Т. В. ВОРОНА¹, Е. Е. КОЖЕВНИКОВА²,
О. А. МИКОСЯНЧИК³, Л. А. ЛОПАТА⁴

¹Кировоградский национальный технический университет, Украина

²Одесская национальная морская академия, Украина

³Национальный авиационный университет, Украина

⁴Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Украина

СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ПОКРЫТИЯХ ИЗ СТАЛЕЙ ФЕРРИТНОГО И МАРТЕНСИТНОГО КЛАССОВ ПРИ ИХ НАПЫЛЕНИИ И МОДИФИЦИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ ОБРАБОТКОЙ

Исследован процесс формирования износостойких покрытий на железо-углеродистых сплавах при газопламенном и электродуговом напылении, и модифицировании поверхностных слоев напыленных покрытий, структурно-фазовые превращения в напыленных покрытиях при их модифицировании. Показано, что наиболее целесообразно высокую износостойкость, твердость и прочие свойства газотермических покрытий из сплавов на основе железа можно обеспечивать таким методом модифицирования, как электроконтактная обработка.

Ключевые слова: электроконтактная обработка, железо-углеродистые сплавы, газопламенное и электродуговое напыление, структурно-фазовые превращения, модифицирование, газотермические покрытия

Введение. Качество машин в значительной мере определяется ресурсом их работы. Ресурс обусловлен износостойкостью деталей, которая является важной эксплуатационной характеристикой, лимитирующей срок их службы. Главной причиной сравнительно низкого ресурса отечественной техники является износ деталей, который составляет 80-90 % от общего количества отказов. Разработку эффективных способов борьбы с износом с целью повышения ресурса машин можно отнести к одной из важных народнохозяйственных задач. Анализ многочисленных исследований показал, что одним из наиболее рациональных и экономически целесообразных решений этой задачи является нанесение износостойких покрытий на рабочие поверхности деталей. Наиболее перспективным методом повышения срока службы малоресурсных деталей является формирование на их рабочих поверхностях износостойких слоев из наиболее доступных и дешевых материалов для покрытий в сочетании с низкостоимостными технологиями их нанесения и последующей обработки для повышения эксплуатационных характеристик создаваемых изделий. В большинстве случаев в качестве наиболее доступных и низкостоимостных материалов покрытий используются железо-углеродистые сплавы (стали). Такими наиболее перспективными материалами являются стали мартенситного (40X13) и ферритного (Св-08) классов, что обусловлено особенностями структурно-фазовых превращений в них при термомеханическом воздействии. Поэтому разработка эффективных способов изготовления деталей с износостойкими покрытиями из сталей ферритного и мартенситного классов повышенной износостойкости - одна из актуальных задач материаловедения. Исследования Борисова Ю. С., Ющенко К. А., Харламова Ю. А., Ивашко В. С., Манойло Е. Д. и др. [1-8] показали, что наиболее рациональным и экономически целесообразным решением указанной задачи явля-



Рис. 2. Результаты количественного стереологического анализа пористости поверхности, восстановленной газотермическими покрытиями: ■ - класс 1, поры 14,39 % площади; ■ - класс 2, основа 89,61 % площади; ■ - прочие 0 % площади

При электроконтактной обработке напыленных покрытий в результате термосилового воздействия ламели имеют более вытяженный характер (рис. 3).

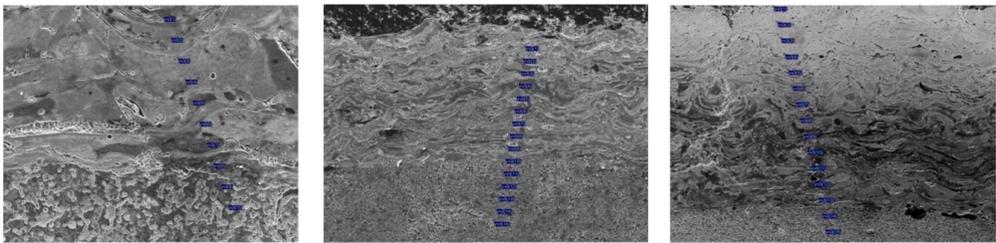
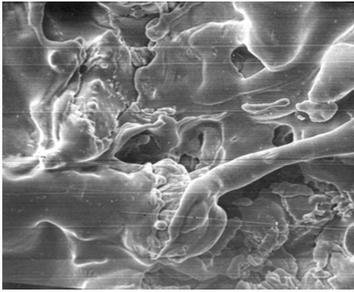


Рис. 3. Микроструктура газотермических покрытий после электроконтактной обработки

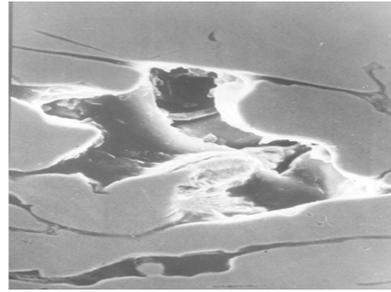
Плотность покрытий (рис.4) заметно повысилась (пористость составила 3-5 %). Уплотнение напыленного слоя хорошо заметно при изучении формы отдельных пор до и после обработкой ЭКО. Исследование микротопографии поверхности напыленного покрытия показало, что отверстия поровых каналов и отдельные поры имеют округлую форму (рис. 5,а). В ходе термосилового воздействия поры принимают вытянутую форму(рис. 5,б), многие из них «схлопываются» и происходит так называемое «залечивание» пор, отмеченное в работах по электроконтактному припеканию [10-11].



Рис.4. Результаты количественного стереологического анализа пористости восстановленной газотермическими покрытиями поверхности после электроконтактной обработки: ■ - класс 1, поры 3,13 % площади; ■ - класс 2, основа 96,87 % площади; ■ - прочее 0 % площади



а



б

Рис. 5. Микротопография поверхности напыленного покрытия (а) и деформация поры после обработкой ЭКО (поперечный шлиф) (б)

В результате электроконтактной обработки напыленных покрытий из проволоочных сталей в поверхностных слоях образуются модифицированные градиентные структуры, содержащие высокопрочную матричную α – фазу (твердый раствор углерода в α -Fe), а также включения карбидов и аустенита. При этом присутствие в модифицированном слое повышенного количества аустенита способствует повышению вязкости разрушения и абразивной стойкости покрытия, а наличие в слое высокопрочных фаз (мартенсит и карбиды) обеспечивает повышенную прочность, а также износостойкость газотермических покрытий в условиях граничного трения и трения без смазки.

При напылении малоуглеродистых нелегированных проволоочных материалов покрытие имеет низкий уровень механических свойств. Твердость напыленных газопламенных слоев существенно ниже, чем в случае электродугового напыления и составляет $HV = 1900$ и 2000 МПа для покрытий из сталей Св-08 и 40Х13 соответственно. Твердость металла и оксидов различна и составляет – $210...280 HV$ и $400...560 HV$ соответственно. Твердость слоев составляет $HV = 2250$ и 3700 МПа для напыленных покрытий из сталей Св-08 и 40Х13 соответственно. Легированные и высоколегированные проволоочные материалы позволяют получать наилучшие свойства ЭДН-покрытий из всех гомогенных проволоочных материалов. Значительное повышение свойств обусловлено упрочняющим действием легирующих элементов в стали. Легированные и высоколегированные проволоочные материалы позволяют получать наилучшие свойства ЭДН-покрытий из всех гомогенных проволоочных материалов. Значительное повышение свойств обусловлено упрочняющим действием легирующих элементов в стали. Хром способствует повышению прокаливаемости стали при быстром охлаждении, поэтому структура покрытий из хромистых сталей состоит в основном из мартенсита и продуктов его отпуска. При значительном содержании хрома в исходной проволоке в покрытии образуются карбиды $Cr_{23}C_6$, а также небольшое количество аустенита. Хром в значительной степени повышает коррозионную стойкость покрытий, а также адгезию покрытия к смазке. На прочность сцепления покрытий хром в чистом виде влияние не оказывает. При электродуговом напылении хром практически не выгорает.

ДюрOMETрические исследования показали, что в процессе электроконтактной обработки происходит увеличение твердости поверхностного слоя и увеличение микротвердости в более глубоких слоях. Выдвинуто предположение, что происходит перекалка поверхностного слоя газотермического покрытия, которая приводит к увеличению микротвердости. В более глубоких слоях в процессе

ЭКО происходит распад остаточного аустенита, сопровождающийся повышением микротвердости (рис. 6, а).

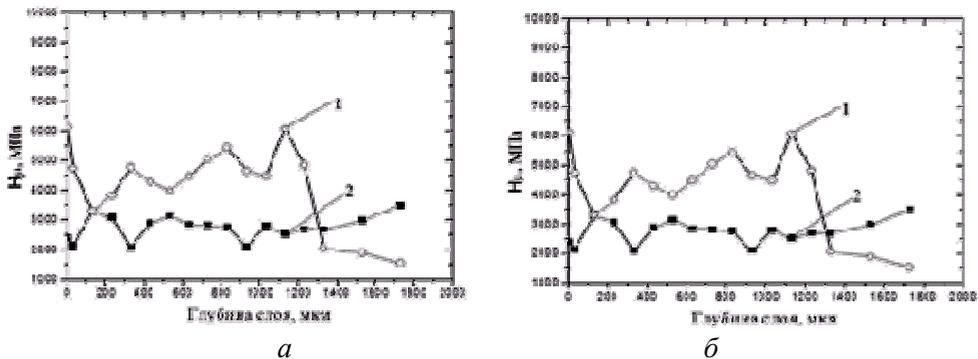


Рис. 6. Распределение микротвердости по глубине напыленных покрытий после электроконтактной обработки: 1 – покрытие из проволоки мартенситного класса 40X13; 2 – покрытие из проволоки ферритного класса Св-08

Электроконтактная обработка образцов покрытия 40X13 с нанесенным на его поверхность слоем коллоидного графита в качестве модификатора сопровождается некоторым повышением микротвердости поверхностного слоя до $H_{\mu} = 5700 \dots 6000$ МПа (рис. 6, б). В слое регистрируется увеличение содержания остаточного аустенита ($V_{\gamma} \approx 20$ об. %) и периода его кристаллической решетки до $a_{\gamma} = 0,3613$ нм, что свидетельствует о насыщении слоя и содержащихся в нем фаз углеродом. Электроконтактная обработка образцов с использованием углеродсодержащих модификаторов приводит к увеличению микротвердости поверхностного слоя до $H_{\mu} = 4000$ МПа. Глубина модифицированного углеродом слоя для стальных покрытий составляет ≤ 100 мкм (рис. 6, б).

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 позволяют оценить соотношение объемных долей алмазной и графитоподобной фаз как 30:70. Использование углеродных модификаторов будет усиливать эффект повышения триботехнических свойств.

Для исследования фазовых и структурных превращений в напыленных слоях при ЭКО (рис. 7) использовался рентгеноструктурный анализ (дифрактометр ДРОН-3.0, монохроматизированное CoK_{α} излучение, $V = 30$ кВ, $I = 10$ мА). Для фазового анализа использовалась стандартная картотека PDF.

Характер распределения микротвердости по глубине напыленного слоя по нашему мнению связан с фазовыми превращениями, протекающими в слое при напылении. При этом необходимо иметь ввиду, 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

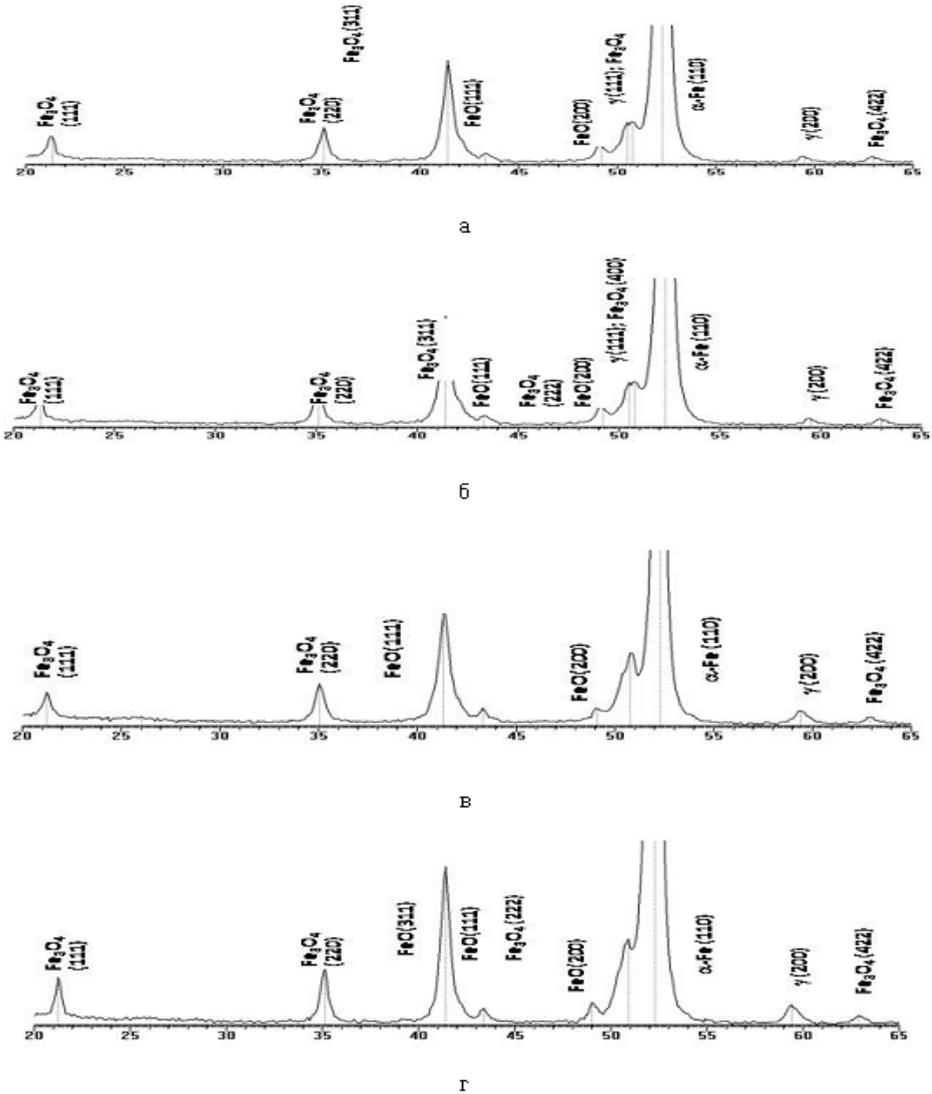


Рис. 7. Фрагменты дифрактограмм покрытий из стали 40X13: *а* – ЭДН покрытие (исходное состояние, механическая шлифовка); *б* – то же + электроконтактная обработка; *в* – то же + электроконтактная обработка с модифицированием коллоидным графитом; *г* – то же + электроконтактная обработка с модифицированием УДАГ

до 250...300°C ранее закристаллизованной поверхности сохраняется повышенное количество остаточного аустенита [12]. При этом стабилизация остаточного аустенита в поверхностных слоях покрытия связана с его изотермической выдержкой в области повышенной устойчивости аустенита при охлаждении [13].

Фазовый состав ЭДН покрытий из стали Св - 08: α -фаза, окислы FeO и оксиды Fe_3O_4 (табл. 1). При этом содержание в покрытии окисла FeO существенно превышает содержание Fe_3O_4 . Содержание $\alpha\text{-Fe}$ в поверхностном слое покрытий (механическая шлифовка на абразивной бумаге) не превышает 20 об.%. В покрытии из проволоочной стали 40X13 содержатся: α -фаза (мартенсит), γ -фаза (аустенит), оксиды Fe_3O_4 и окислы FeO (табл. 1)

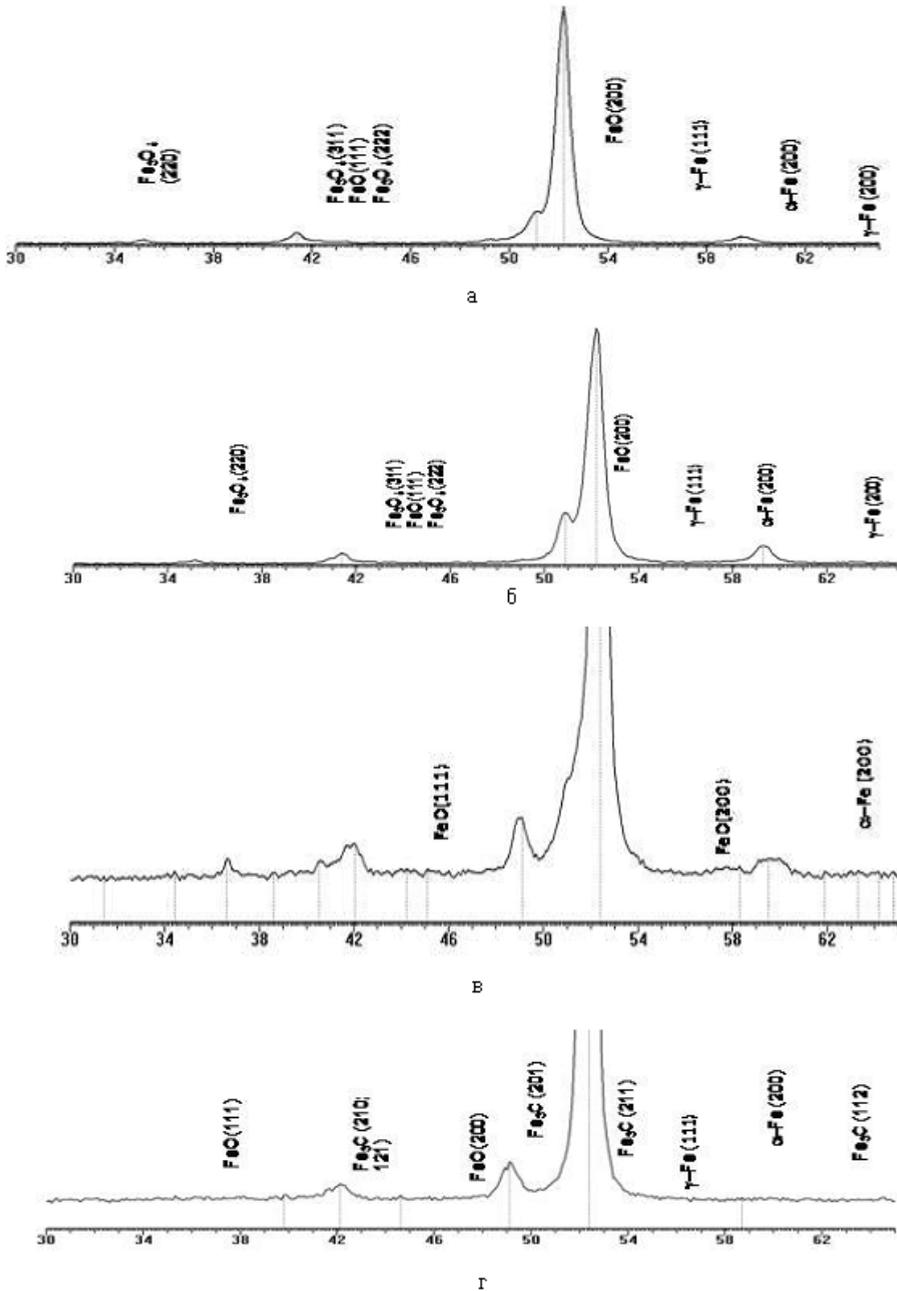


Рис. 8. Фрагменты рентгеновских дифрактограмм (CoKα) от поверхностных слоев ГПН покрытий из стали 40X13 (а, б) и Св-08 (в, з): а-исходное состояние 40X13 (газопламенное напыление); б -40X13 (ЭКО+УДАГ); в- исходное состояние Св-08 (газопламенное напыление); з - Св-08 (ЭКО+УДАГ)

Таким образом, в результате электроконтактной обработки напыленных покрытий с углеродсодержащими добавками в поверхностных слоях образуются модифицированные градиентные структуры, содержащие высокопрочную матричную α – фазу (твердый раствор углерода в α-Fe), а также включения карбидов и аустенита. Присутствие в модифицированном слое повышенного количества аустенита

будет способствовать повышению вязкости разрушения и абразивной стойкости покрытия, а наличие в слое высокопрочных фаз (мартенсит и карбиды) обеспечивать повышенную прочность и износостойкость газотермических покрытий.

Таблиця 1

Фазовый состав покрытий из проволоки 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

На основании проведенных нами исследований установлено, что при газопламенном напылении проволоки сталей ферритного класса (Св-08) формируются слои с относительно низким уровнем твердости, который обусловлен малой концентрацией окислов и невысоким содержанием остаточного аустенита. При газопламенном напылении проволоки сталей мартенситного класса (40X13) формируются слои с высокой твердостью, которая обеспечивается высоким содержанием остаточного аустенита ($U_r = 30...50$ об. %), т.е. имеет место «эффект остаточного аустенита». Высокое содержание остаточного аустенита связано с присутствием в структуре формируемых напылением слоев метастабильного аустенита с низкой температурой деформационного $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения (270 – 320 К). Причиной «аустенитного эффекта» (высокого содержания остаточного аустенита) является более высокая концентрация в них легирующих элементов (хрома и углерода) и полное растворение карбидов хрома при расплавлении проволоки и насыщения капель расплава углеродом из пламени газопламенного факела.

При электродуговом напылении проволоки из сталей мартенситного класса меньшее количество аустенита в покрытиях обусловлено существенно более высокой скоростью полета расплавленных частиц, характерной для данного способа напыления. Процессы диффузионного насыщения капель расплава углеродом из восстановительной атмосферы продуктов сгорания пропановоздушной смеси пройти не успевают (время полета расплавленных капель в атмосфере продуктов сгорания не более $5 \cdot 10^{-4}$ с) и содержание остаточного аустенита в слое снижается.

Таким образом, активирование процесса напыления и последующее модифицирование поверхностных слоев электроконтактной обработкой позволяет 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. В связи со сказанным, целесообразным является разработка нового подхода к проектированию

технологии ГПН/ЭДН покрытий из железо-углеродистых сплавов, в основе которого должно лежать создание и использование фазово-структурных деформационных превращений, что обеспечило бы повышение их износостойкости и комплексное улучшение физико-механических и эксплуатационных свойств.

Выводы. Таким образом, в работе предлагается новый подход к конструированию износостойких покрытий из сталей мартенситного и ферритного классов, который заключается в сочетании газопламенного напыления (ГПН)/электродугового напыления (ЭДН) покрытий с их электроконтактной обработкой (ЭКО). В основе этого подхода лежит влияние электроконтактной обработки (ЭКО) на структурно - фазовые $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения в ГПН/ЭДН стальных покрытиях. Научная гипотеза, положенная автором в основу предлагаемого подхода к повышению износостойкости ГПН/ЭДН покрытий из железо-углеродистых сталей мартенситного и ферритного классов путем из модифицирования методом ЭКО за счет формирования в покрытиях из этих сталей двухфазной структуры, содержащей 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 $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения.

Список литературы

1. Витязь П.А. Теория и практика газотермического напыления / Витязь П.А., Ивашко В.С., Манойло Е.Д. [и др.]. — Минск: Навука і тэхніка, 1993. — 295 с.
2. Ильющенко А.Ф., Формирование газотермических покрытий: теория и практика./ Ильющенко А.Ф., Оковитый В.А, Кундас С.П., Форманек Б – Мн., 2002.
3. Витязь П.А.Ю. Упрочнение газотермических покрытий./ Витязь П.А.Ю Азизов Р.О., Белоцерковский М.А – Мн.: Бестпринт, 2004. – 192 с.
4. П.А. Витязь Теория и практика газопламенного напыления/ П.А. Витязь, В.С. Ивашко, Е.Д.Манойло и др. – Минск: Навука і тэхніка, 1993. – 295 с.
5. Белоцерковский М.А. Технологии активированного газопламенного напыления антифрикционных покрытий./ Белоцерковский М.А - Мн.: Технопринт. – 2004. – 200 с.
6. Белоцерковский М.А. Активированное газопламенное распыление проволочных материалов / Белоцерковский М.А//Весці НАН Б сер .фіз. - тэхн. навук, 2002. - №1. - С. 11-15.
7. Белоцерковский, М.А. Технологические особенности и области использования гиперзвуковой металлизации / М.А. Белоцерковский, А.С. Прядко, А.Е. Черепко // Инновации в машиностроении: Сборник научн. трудов. (Минск, 30-31 октября 2008 г.) / Редкол.: М.С. Высоцкий [и др.]. Минск' ОИМ НАН Беларуси. 2008 - С. 479-484.
8. Коробов Ю.С. Эффективность применения активированной электродуговой металлизации защитных покрытий./ Коробов Ю.С.// Свароч. пр-во.- 2005. - № 2. - С. 47-50, 62, 64.
9. Лопата Л.А. Разработка технологии нанесения износостойких порошковых покрытий электроконтактным припеканием с силовым активированием сдвигом: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук.Л.А.Лопата – Минск, 1987 - 214 с.
10. Л.А. Лопата Повышение качества металлизационных покрытий /. Л.А. Лопата, Н.А. Савченко //Високи технології в машинобудуванні. Збірник наукових праць НТУ “ХПІ”. –2001. - №1. – С. 175-179.

11. Медведева Н.А. Повышение прочности сцепления и снижение пористости напыленных покрытий из порошковых материалов электроконтактным припеканием: дис. канд. техн. наук: 05.03.06 /Медведева Наталья Анатольевна. КНТУ. - 2006.

12. П.А. Витязь Структура и свойства покрытий из стали 40X13, полученных с использованием различных методов газотермического напыления / М.А. Белоцерковский, В.А. Кукареко, Д.М. Калиновский, П.Г. Сухоцкий, Ж.Г. Ковалевская.// Физическая мезомеханика. - 2002, -Т.5, -№ 1. - С. 15-22.

13. 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.

Стаття надійшла до редакції 26.05.2015

*M. I. CHERNOVOL, T. V. VORONA, O. Ye. KOZHEVNIKOVA,
O. A. MIKOSIANCHYK, L A. LOPATA*

STRUCTURA AND PHASE TRANSFORMATIONS IN COATINGS FROM FERRITIC AND MARTENSITIC STEELS UNDER GAS-THERMALSPRAING AND MODIFYING BY ELECTRIC-CONTACT TREATMENT

In the initial state of gas-thermal coatings from steels of the martensite (FKh800) and ferrite types, the matrix phase is the alpha-phase, which is formed independently of the production method before electric contact treatment during the coating deposition at the stage of steel drop hardening owing to its collision with the working surface due to the gamma-alpha transformation and is characterized by high hardness. Additionally, there are also some contents of iron oxides FeO; and Fe₃O₄, which arise in the course of coating deposition as a result of the interaction of melted iron particles of the steel with the oxygen of the working gas flow. The high content of carbon in steel 40Kh13 (0.48 at%) as compared to steel Sv-08 (0.06 at%) is related to the formation of residual austenite (gamma-phase) and high saturation of the alpha-phase with carbon, which is confirmed by the increase in the alpha-phase lattice parameters in the coatings from steel 40Kh13 comparing to steel Sv-08 as well as by higher microhardness ($HV = 3000$ and 1750 MPa, respectively). Moreover, the higher carbon content in coatings from steel 40Kh13 is the reason of the appearance of residual austenite (gamma- phase) alongside with alpha-phase at the all stages of coating deposition. The intense thermal action of electric contact treatment promotes the further increase in the carbon content in the alpha- phase. Also, the electric contact treatment of coatings from Sv-08 and 40Kh13 steels leads to decrease in porosity and increase in the content of oxygen in the surface layer. This is accompanied with increasing microhardness after the treatment. In coatings from steel 40Kh13 the content of residual austenite decreases from the initial value 16 vol. % down to 8 vol. %, which is connected with the surface heating.

Keywords: electric contact treatment, gas-thermal coatings, ferrite and austenite steels, alpha and gamma phases, residual austenite, iron oxides, microhardness.

Черновол Михаил Иванович – д-р техн. наук, профессор, академик Аграрной академии наук Украины, ректор, Кировоградский национальный технический университет, пр. Университетский, 8, г. Кировоград, Украина, 25006, тел./факс: +38 0522 39 04 12, E-mail: stat_kntu@ukr.net.

Ворона Татьяна Витальевна – аспирант, Кировоградский национальный технический университет, пр. Университетский, 8, г. Кировоград, Украина, 25006, тел.: +38 066 456 15 17, E-mail: krakazyblik@ukr.net.

Кожевникова Елена Евгеньевна – старший преподаватель, Одесская национальная морская академия, ул. Дидрихсона, 8, г. Одесса, Украина, 65029, тел.: +38 067 483 08 78, E-mail: lenak2001@ukr.net.

Микосянчик Оксана Александровна – канд. техн. наук, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности, Национальный авиационный университет, пр. Космонавта Комарова, 1, г. Киев, Украина, 03058, тел.: +38 044 406 78 91, E-mail: oksana.mikos@bk.ru.

Лопата Лариса Анатольевна – канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко, ул. Тимирязевская, 2, г. Киев, Украина, 01014, тел.: +38 067 517 19 19, E-mail: beryuza@ukr.net.