

УЛУЧШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ

М.С. Агеев, канд. техн. наук, доц.,
Херсонская государственная морская академия, г. Херсон, Украина
М.А. Белоцерковский, д-р. техн. наук, зав. лаб.
ОИМ НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь
Р.Г. Мнацаканов, д-р. техн. наук, проф.,
О.В. Радько, канд. техн. наук, доц., н.с.,
Национальный авиационный университет, г. Киев, Украина
А.В. Дудан, канд. техн. наук, доц.,
Полоцкий государственный университет, г. Новополоцк, Беларусь

Из многообразия способов нанесения УЗП наиболее распространенными технологиями, используемыми при повышении эксплуатационных свойств деталей, являются методы газотермического напыления (ГТН), среди которых самым дешевым и простым методом является метод электродугового напыления (ЭДН) [1, 2].

Главные недостатки напыленных покрытий – низкая прочность сцепления из-за значительной пористости, недостаточно высокая износостойкость и микротвердость из-за выгорания углерода и легирующих элементов при напылении [1, 2]. Для улучшения этих характеристик покрытий сложилась тенденция применения интегрированных многооперационных технологий. Существенное повышение свойств покрытий, полученных ЭДН, возможно путем сочетания ЭДН с лазерной (ЛО), ультразвуковой (УЗО), электроискровой (ЭИЛ), электронно-лучевой (ЭЛО) и др. методами обработки [4, 5]. Эффективным путем решения задачи повышения эксплуатационных характеристик ЭДН-покрытий является формирование в них высокопрочных поверхностных слоев посредством использования различных методов химико-термической обработки (ХТО) [4, 6]. В попытках повышения свойств ЭДН-покрытий методами ХТО отмечают преимущество азотирования. Методы азотирования отличаются технологичностью, экологической безопасностью и экономической эффективностью. Для улучшения свойств обработки ЭДН-покрытий было выбрано газотермоциклическое импульсное азотирование (ГТЦ ИА) [7-9].

Объединение нанесения покрытий ЭДН с азотированием позволяет создать комбинированный метод инженерии поверхности. С целью обоснования и доказательства целесообразности разработки технологий формирования УЗП на основе сочетания процесса ЭДН с азотированием нами были проведены исследования. В результате проведенных исследований была произведена оценка возможности повышения качества покрытий, полученных ЭДН (ЭДН-покрытий) путем последующей обработки азотированием. Напыленные слои, обработанные азотированием, характеризуются повышенным уровнем микротвердости (табл. 1).

Таблица 1 – Влияние температуры ИИА на микротвердость ЭДН - покрытий

Материал покрытия	Микротвердость, ГПа при различной $T, ^\circ\text{K}$ ГТЦ ИА						
	600	620	650	670	700	720	770
Стали мартенситного класса	8,6	11,3	12,9	14,0	15,9	12,7	11,3
Стали аустенитного класса	5,6	6,2	8,0	8,9	11,1	12,0	11,8

Микротвердость напыленного слоя достигает уровня максимальных значений (14000–15900 МПа). при температуре азотирования 670–720⁰К. Основной причиной, обуславливающей небольшую глубину насыщения азотом ЭДН-покрытий (15–30 мкм) является наличие большого количества оксидных пленок в покрытии, являющихся барьером для осуществления процесса азотирования. Оксиды неизбежно образуются как во время полета расплавленных частиц, так и в процессе их кристаллизации на поверхности детали. По этой же причине покрытия, имеющие пористость более 7 % практически невозможно упрочнить без образования дефектных участков, поскольку поверхность покрыта тонким слоем оксидов железа. Устранить образование оксидных пленок возможно при распылении стальных проволок не воздухом, а продуктами сгорания пропана и воздуха. Согласно полученных данных, по мере увеличения температуры азотирования покрытий до 530–640⁰К, полученных распылением продуктами сгорания пропана и воздуха, возрастает глубина модифицированного слоя до 50...90 мкм. Таким образом, изменяя температуру процесса азотирования напыленных покрытий можно управлять глубиной диффузионного слоя и его микротвердостью.

В результате триботехнических испытаний (давление 0,64 МПа, сухое трение) ЭДН-покрытий после различных режимов азотирования установлено, что увеличение температуры азотирования напыленных покрытий из стали 40X13 приводит к резкому увеличению их износостойкости. Наиболее высокой износостойкостью обладают напыленные покрытия, обработанные азотированием при 670–770⁰К. Интенсивность износа контртела (закаленная сталь 60Г, HV=7800–8000 МПа) несколько снижается при переходе от ЭДН-покрытий к ЭДН-покрытиям после азотирования. Азотирование покрытий из стали X18N10T при 500 – 520⁰К, не сопровождается возрастанием износостойкости поверхности стали в условиях контактного взаимодействия без смазки. При переходе к более высоким температурам (670⁰К, 720⁰К и 770⁰К) износостойкость покрытий существенно возрастает. Повышенная износостойкость напыленного покрытия после азотированного при 770⁰К обусловлена глубиной азотирования высоким уровнем микротвердости. Обработка ЭДН-покрытий азотированием приводит к резкому возрастанию их износостойкости. Так, интенсивность изнашивания покрытий из стали 40X13 при сухом трении снижается с $I_h = 110$ мкм/км до $I_h = 19$ мкм/км. На стадии установившегося трения интенсивность изнашивания ЭДН-покрытия после обработки ИИА уменьшается до $I_h = 5–6$ мкм/км. При этом износостойкость модифицированного слоя из стали 40X13 в 2,6 раза выше износостойкости ЭДН-покрытия (рис. 1).

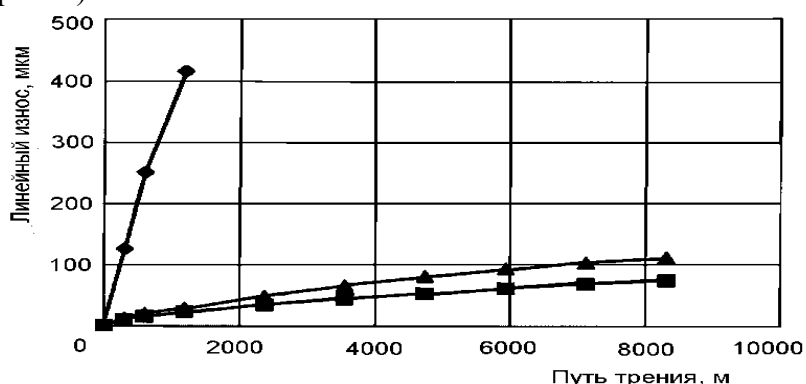


Рисунок 1 – Зависимость линейного износа от пути сухого трения:

■ - ЭДН-покрытие + ГТЦ ИА; ▲ - ЭДН-покрытие; ◆ - литая сталь 45 (закалка и отпуск); материал покрытия - сталь 40X13

Исследование микротопографии поверхностей слоев ЭДН-покрытий после азотирования показало, что пористость покрытий отрицательно сказывается на качестве напыленных поверхностей. Установлено, что на предварительно шлифованных слоях пористостью более 7% после азотирования на поверхности трети образцов появляются участки вспучивания (вздутия) покрытия размером до 200–500 мкм. После отслаивания

участки вспучивания превращаются в каверны. Очевидно, что чем больше пористость слоев, тем сильнее проявляется эффект вспучивания. Поэтому ЭДН-покрытия формировали распылением проволочных сталей 40X13 и 12X18H10T продуктами сгорания пропана и воздуха, а не распыление материала покрытия только воздухом, что обеспечило пористость покрытий менее 7 %. Проведенные исследования показали (табл. 2), что при плотности напыленных слоев более 94% данный эффект не возникает.

Таблица 2 – Результаты исследования топографии поверхности напыленных слоев после азотирования при 580 К

Метод напыления	Напыляемый материал	Пористость слоя, %	Микротопография поверхности
ЭДН (распыление воздухом)	Стали ферритного класса	≈ 10 ≥ 8	вспучивание вспучивание
ЭДН (распыление продуктами сгорания пропана и воздуха)		≈ 6 ≈ 5	гладкая без изменений гладкая без изменений
ЭДН - распыление материала покрытия воздухом	Стали мартенситного класса	≈ 10 ≥ 8	вспучивание вспучивание
ЭДН (распыление продуктами сгорания пропана и воздуха)		≈ 6 ≈ 5	гладкая без изменений гладкая без изменений

Рост прочности сцепления характерен для покрытий, имеющих пористость в диапазоне 5–14 %, и дальнейшее повышение пористости приводит к снижению адгезии. Таким образом, исследование прочности сцепления ЭДН - покрытий показало, что их обработка азотированием позволяет значительно повысить адгезию (табл. 3). Повышение адгезии ЭДН-покрытий после азотирования обусловлено развитием диффузионных процессов на границе между покрытием и подложкой, восстановлением окислов на поверхности подложки, релаксацией внутренних напряжений в покрытии.

Таблица 3 – Влияние пористости на прочность сцепления ЭДН-покрытий (без нанесения подслоя)

Материал покрытия	Прочность сцепления (МПа) при различной пористости (%)					
	≤ 4	5–9	7–10	10–14	12–16	13–17
Св-08Г2С	38	49	61	53	40	36
40X13	37	43	55	47	43	35
40X13	41	55	67	63	50	39

Выводы. Нами были проведены исследования с целью разработки многооперационной технологии формирования УЗП на основе сочетания процесса ЭДН с последующей обработкой ИИА.

Была произведена оценка возможности повышения качества ЭДН-покрытий из сталей мартенситного (40X13) и аустенитного (12X18H10T) классов путем их обработки азотированием. Исследован фазовый состав и микротвердость покрытий, полученных распылением проволок из сталей аустенитного и мартенситного классов. В результате экспериментальных исследований влияния модифицирующего воздействия азотирования на физико-механические свойства стальных ЭДН-покрытий установлено, что для повышения эффективности процесса азотирования необходимо использовать напыленные покрытия пористостью не более 7 %, что позволяет обеспечить формирование поверхностных слоев с микротвердостью 6,5 – 15,0 ГПа и толщиной 20-50 мкм. Таким образом, насыщение азотом ЭДН-покрытий из проволочных сталей 40X13 и X18H10T приводит к образованию

диффузионного слоя толщиной 40-50 мкм, микротвердостью 6500–15000 МПа. При этом прочность сцепления покрытий увеличивается в 1,6 раза, а износостойкость в 2,5-5 раз.

Показано, что дуплексная (комбинированная) технология, сочетающая электродуговое напыление и азотирование позволяет получить значительный эффект по повышению твердости, прочности сцепления и износостойкости системы деталь-покрытие при снижении вероятности деформации детали. Процесс азотирования не создает сплошного нагрева детали, а обеспечивает нагрев только поверхностного слоя на необходимую для упрочнения глубину. Азотирование не изменяет форму, размеры детали и шероховатость ее поверхности, поэтому его можно использовать в качестве финишной обработки. Циклический характер процесса нагрева позволяет сократить в 2.5 раза мощность источников питания. В связи с изложенными результатами исследований и дальнейшей необходимостью проведения исследований по дуплексной технологии электродугового напыления и азотирования и прочностных свойств элементов конструкций с этими покрытиями.

Список литературы

1. Ильющенко А.Ф. Формирование газотермических покрытий: теория и практика. [Текст] / А.Ф. Ильющенко, В.А. Оковитый, С.П. Кундас, Б. Форманек - Мн.: 2002. – 245 с.
2. Бороненков В. Н. Основы дуговой металлизации. Физико-химические закономерности. [Текст] / В. Н. Бороненков, Ю. С. Коробов – Екатеринбург, УрГУ, Унив. изд-во; 2012, - 267 с.
3. Студент М.М. Розробка захисних та відновних електрометалізаційних покриттів з використанням порошкових дрітків: автореф. дис ... канд. техн. наук: 05.02.01. Львів, 1998. 18 с.
4. Витязь П.А. Упрочнение газотермических покрытий. [Текст] / П.А. Витязь, Р.О. Азизов, М.А. Белоцерковский – Мн.: Бестпринт, 2004. – 192 с.
5. Лопата Л.А., Медведева Н.А., Туник Т.М, Салий С.Г. Повышения качества напыленных покрытий. Мир Техники и Технологий, Международный технический журнал, №8 (54), 2005. – С.54-56.
6. Витязь П.А., Азизов Р.О., Белоцерковский М.А., Кукареко В.А. Повышение качества газотермических покрытий из проволочных материалов методами химико-термической обработки. Трение и износ. – 2003. – Т. 24, № 6. – С. 666–672.
7. Белоцерковский М.А. Константинов В.М., Ткаченко Г.А. Упрочнение химико-термической обработкой покрытий, полученных высокоскоростным распылением стальных проволок. Инженерия поверхности, Новые порошковые композиционные материалы. Сварка: сб. докл. Межд. Симпозиума (Минск, 25-27 марта 2009). – ГНПО ПМ НАН Беларуси, Минск: ОИМ НАН Беларуси, 2009. – С. 178–184.
8. Ляшенко Б.А., Белоцерковский М.А., Лопата В.Н., Брусило Ю.В., Е.В. Корбут Газотермическое напыление и ионное азотирование – перспективное сочетание. Инжен. поверхн. и реновация изделий: матер. 14-й Междун. научн. – техн. конф. (Свялява, 2-6 июня 2014). Киев: АТМ України, 2014. - С.79-80.
9. M. Ageev, L. Lopata, T. Smirnova, A. Dudan Of combined electric arc coatings. International scientific Journal Prombles of tribology 2019, Vol 24 № 3/93. - P/ 56-61.