

Белоцерковский М.А.

ВЛИЯНИЕ СООТНОШЕНИЯ ГАЗОВ, ОБРАЗУЮЩИХ ФАКЕЛ ПРИ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОМ НАПЫЛЕНИИ, НА СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ

Введение. Использование технологий газотермического напыления защитных износостойких покрытий из порошковых и проволочных материалов на быстроизнашивающиеся детали позволяет снизить затраты материальных, энергетических и трудовых ресурсов для обеспечения надежной эксплуатации машин и механизмов, сократить простои оборудования, увеличить выпуск продукции, повысить ее качество. Сравнивая энергетическую эффективность и технические показатели различных технологий восстановления деталей машин и механизмов общемашиностроительного профиля (детали из сталей, чугунов, цветных металлов и их сплавов), учитывая стоимость материалов, используемых при нанесении покрытий, было установлено, что одними из наиболее эффективных и экономичных методов являются активированное газопламенное напыление (ГПН) и гиперзвуковая металлизация (ГМ) [1–3].

Как при реализации технологий ГПН порошковых и проволочных материалов, так и для осуществления процесса ГМ используется факел газокислородного или газозооудного пламени, который в газопламенных установках служит для нагрева напыляемого материала и дальнейшей транспортировки частиц со скоростью 30–150 м/с, а в гиперзвуковых металлизаторах – для диспергирования расплавленных в электрической дуге проволок и ускорения образующихся частиц до скоростей 400–500 м/с.

Эксплуатационные показатели покрытий в значительной степени определяются не только свойствами исходных напыляемых материалов и динамическими параметрами факелов, но и физико-химическими процессами, происходящими в зонах нагрева и транспортировки частиц. Исходя из этого, состав горючей смеси, образующей факел, может играть важную роль в обеспечении требуемых характеристик покрытий, а в некоторых случаях оказывать на них преобладающее влияние по сравнению с другими режимными параметрами.

Целью экспериментальных исследований, результаты которых приведены в данной работе, явилась оценка влияния состава горючей смеси (содержания окислителя и пропана) на некоторые свойства газотермических покрытий из металлов и полимеров.

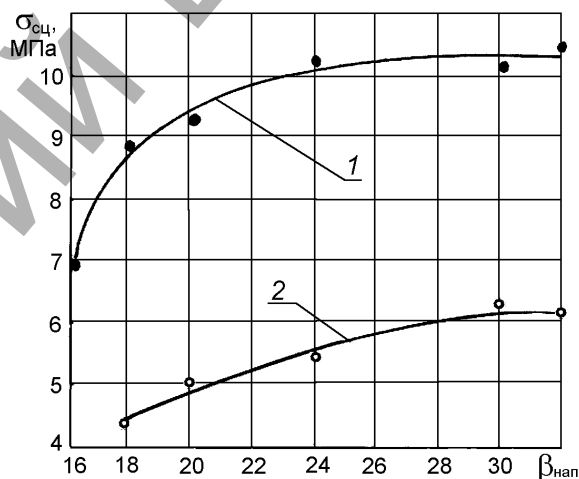
Газотермическое напыление покрытий осуществлялось с использованием термораспылителей, разработанных в ОИМ НАН Беларуси: «ТЕРКО» (активированное газопламенное проволочное напыление), «ТЕРКО-П» (газопламенное напыление порошками полимеров), «АДМ-10» (гиперзвуковая и традиционная электродуговая металлизация). В экспериментах для напыления покрытий использовались проволоки из алюминия СвА-95, сталей 95Х18Ш и 40Х13, смесь порошков полиамида ПА-6 и полиэтилена низкого давления (ПЭНД).

Известно, что пламя, в зависимости от степени сгорания горючего газа в окислителе (воздухе или кислороде), бывает «окислительным», «нормальным» и «восстановительным» [4, 5]. Нормальное пламя образуется при горении стехиометрического состава горючей смеси, когда все молекулы углеводорода вступают во взаимодействие с молекулами кислорода. Окислительное пламя образуется при горении с избытком в смеси кислорода. Восстановительное пламя (копящее) образуется при избытке горючего газа. Окислительное пламя имеет предельную концентрацию окислителя, выше которой процесс горения прекращается. Аналогично и восстановительное пламя имеет нижний предел окислителя.

Поскольку в установках газопламенного напыления полимерных порошков типа «ТЕРКО-П» для образования факела пламени используется пропано-воздушную смесь, было исследовано влияние количества воздуха в смеси на адгезию и интенсивность изнашивания покрытий из смеси порошков ПА 6 – ПЭНД. Согласно данных

работы [5], для аппаратов газопламенной обработки (напыления, резки, термообработки) нижний предел восстановительного пламени для смеси пропан – воздух составляет 16 объемов воздуха на 1 объем пропана (т.н. коэффициент $\beta = 16$). Дальнейшее понижение содержания воздуха вызывает появление большого количества не прореагировавшего углерода в виде копоти. Верхний предел содержания воздуха в смеси, образующей окислительную пламя, составляет 32 объема воздуха на 1 объем пропана ($\beta = 32$). Последующее увеличение содержания окислителя приводит к отрыву пламени, хлопкам, прекращению горения.

Адгезию полимерных покрытий к стальным подложкам оценивали с использованием отрыва штифта нормально приложенной нагрузкой. Сопоставляя результаты исследования адгезии полимерных покрытий, напыленных различной по составу пропано-воздушной смесью и порошками различных фракций, установлено (рисунок 1), что наибольшие значения прочности сцепления достигаются при использовании окислительного пламени и порошков с наименьшим размером частиц.



1 – частицы размером 50...63 мкм; 2 – частицы размером 100...200 мкм
Рис. 1. Влияние состава горючей смеси на адгезию покрытий из ПА 6 – ПЭНД, напыленных частицами различного размера

Полученные данные можно объяснить эффектом повышения адгезии полимеров к металлам при возникновении у полимеров кислородосодержащих групп (–ОН, –СООН и др.), установленным сотрудниками Института механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси [6]. Интенсификация процесса окисления частиц полимера при повышенных температурах в окислительном пламени обусловила увеличение адгезионных свойств наносимых полимерных покрытий, причем наибольший эффект достигается при термоокислении порошков, у которых большая поверхностная площадь контакта частиц с кислородом воздуха способствует образованию значительного числа кислородосодержащих групп.

Для того чтобы обеспечить у напыленных полимерных слоев уровень физико-механических свойств, близких к свойствам литых полимеров, необходимо свести к минимуму воздействие как факела пламени, так и окислительной окружающей среды. Только исключив влияние внешних факторов можно прогнозировать характеристики формируемых покрытий. С этой целью было предложено наносить покрытие из одного порошкового материала в две стадии – сначала подслои,

Белоцерковский Марат Артемович, доктор технических наук, зав. лабораторией газотермических методов упрочнения деталей машин ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси».

Беларусь, ОИМ НАН Беларуси, 220072, г. Минск, ул. Академическая, 12, e-mail: mbelotser@gmail.com

затем основной слой, при этом используются различные горючие смеси [7]. Напыление предварительного слоя осуществлять порошком с размером частиц менее 60 мкм при соотношении воздуха и пропана в смеси от 24/1 до 32/1, напыление основного покрытия осуществлять порошком с размером частиц 100...300 мкм при соотношении воздуха и пропана в смеси от 20/1 до 24/1, а оплавление покрытия производить при соотношении воздуха и пропана в смеси от 16/1 до 20/1.

Исследования, проведенные с образцами покрытий из ПА 6 – ПЭНД показали (рисунок 2), что минимальная интенсивность изнашивания при сухом трении (удельная нагрузка 0,5 МПа, скорость 0,2 м/с, трибометр типа АПВТ) обеспечивается при напылении основного покрытия «нормальным» пламенем порошком с размером частиц более 100 мкм, и оплавлении покрытия восстановительным пламенем.

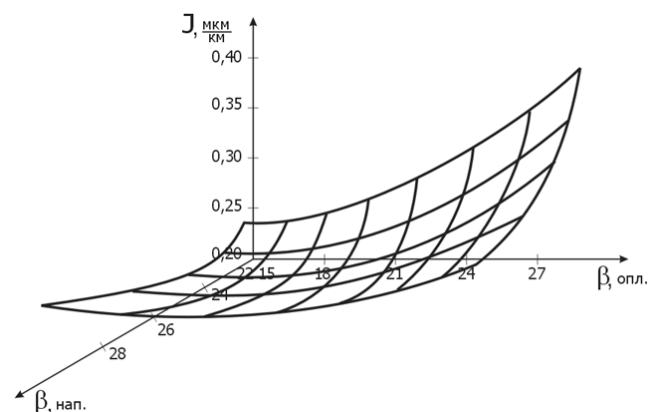


Рис. 2. Влияние состава горючей смеси при напылении и оплавлении на интенсивность изнашивания полимерных покрытий

Следующий этап исследований был посвящен изучению влияния состава распыляющего факела установок гиперзвуковой металлизации на свойства покрытий, полученных распылением алюминиевых проволок.

Покрытия толщиной 0,56–0,58 мм наносили распылением проволоки СвА-95 на образцы из низкоуглеродистой стали, предварительно прошедшими подготовку поверхности струйно-абразивным методом. Подслой для повышения адгезии не наносился. Объемное содержание оксида алюминия в напыленных покрытиях оценивалось рентгеноструктурным методом. Прочность сцепления покрытий определяли методом отрыва штифта нормально приложенной нагрузкой. Относительная износостойкость покрытий определялась на машине трения типа Хрущева – Бабичева путем замера времени до образования лунки на всю толщину покрытия, вытираемой торцом вращающегося диска из стали 17Х20Н8Т на покрытие, погруженном в 8% раствор соляной кислоты. Глубина проникновения диска в покрытие определялась с помощью прибора «БИМП». Результаты исследований приведены в таблице 1.

Таблица 1. Влияние состава горючей смеси при гиперзвуковой металлизации проволоками СвА-95 на количество образующегося в покрытии оксида алюминия, прочность сцепления покрытий на отрыв и относительную стойкость

Соотношение пропана и воздуха в смеси	Количество Al ₂ O ₃ , об. %	Средняя прочность сцепления, МПа	Относительная износостойкость
1 : 16	≤ 5	45	1,0
1 : 17	≈ 5	45	1,0
1 : 18	6–9	43	1,3
1 : 20	11–14	39	2,1
1 : 22	15–18	37	2,4
1 : 23	20–25	34	2,6
1 : 25	25–30	30	3,1
1 : 26	34–40	27	3,6
1 : 28	55–63	22	4,2
1 : 30	67–74	19	4,7

Анализ полученных результатов показывает, что при распылении расплавленной алюминиевой проволоки потоком продуктов сгорания пропано-воздушной смеси, содержащей избыток пропана (соотношение объемов пропана к воздуху от 1:17 до 1:19 – «восстановительное пламя») происходит минимальное окисление распыляемых частиц, что позволяет достичь высоких значений прочности сцепления наносимого слоя с поверхностью детали. Повышение содержания воздуха в смеси до стехиометрического (1:22–1:26) вызывает интенсификацию процесса окисления частиц, что отрицательно сказывается на адгезии. Дальнейшее повышение содержания воздуха смеси (1:28 – 1:30 – «окислительное пламя») резко увеличивает количество оксида алюминия в покрытии. Необходимо отметить, что смесь с соотношением пропана и воздуха 1:16 горит неустойчивым коптящим пламенем, что вызывает появление частиц сажи в покрытиях. Горение смеси, содержащей воздух более, чем 30 объемных частей, также неустойчиво и сопровождается периодическими обратными ударами пламени.

Повышенная стойкость к коррозионно-механическому изнашиванию обеспечивается образованием в слоях, напыляемых продуктами сгорания пропано-воздушной смеси при отношении содержания пропана к воздуху в смеси от 1:28 до 1:30, корунда – α-фазы оксида алюминия.

Оксид алюминия (Al₂O₃) обладает исключительным набором свойств, таких как высокой твердостью (корунд является третьим по твердости, по шкале Мооса твердость 9), хорошей теплопроводностью, отличной коррозионной стойкостью в широком интервале температур. Все эти сочетания делают покрытия, содержащие оксид алюминия, незаменимыми при изготовлении коррозионностойких, износостойких, электроизоляционных и термостойких изделий для самых различных отраслей промышленности.

На основании полученных данных разработан способ формирования износ- и коррозионностойких покрытий [8], суть которого заключается в том, что при нанесении первого слоя алюминия отношение содержания пропана к воздуху в смеси выбирают от 1:17 до 1:19, а последующие слои наносят при отношении содержания пропана к воздуху в смеси от 1:28 до 1:30.

Поверхностный слой на алюминии, состоящий из оксидов, можно получить используя технологию микродугового оксидирования [9]. Этот метод также был успешно использован для модифицирования алюминиевых газотермических покрытий [10], но при этом отмечалось, что кинетика формирования и свойства оксидокерамического слоя на газотермических и, в частности, газопламенных покрытиях, несколько отличается от слоев, полученных на монолитных алюминиевых сплавах. Используя оборудование для газопламенного напыления и гиперзвуковой металлизации были получены алюминиевые покрытия различной пористости и с различным содержанием кислорода. Последнее достигалось изменением состава пропано-воздушного факела.

Микродуговое оксидирование покрытий осуществлялось на промышленной частоте при напряжении 420 В, плотности тока 15–30 А/дм² в модифицированном электролите, основными компонентами которого являлись растворенные в дистиллированной воде жидкое стекло Na₂SiO₃ с модулем 3–3,4, плотностью 1,4–1,5 г/см³ (ГОСТ 13087 – 81) – 4–6 г/л и гидроксид калия КОН марки «ч» (ГОСТ 9285 – 78) – 3 г/л. Установлено, что пористость покрытий в результате оксидирования (пористость оксидированных слоев) увеличивалась до 10–13% в зоне с максимальной микротвердостью и до 20 % на поверхности оксида. Кроме того, в процессе исследований было отмечено уменьшение времени оксидирования на 8–15 % при увеличении поверхностной пористости напыленного слоя. Однако при этом снижалась максимальная твердость оксидированного покрытия. Повышение объемной пористости покрытий, полученной в процессе напыления, позволяло значительно увеличить толщину оксидированного слоя. Обратный эффект возникал при увеличении содержания кислорода (количества окислов) в покрытиях (рисунок 3).

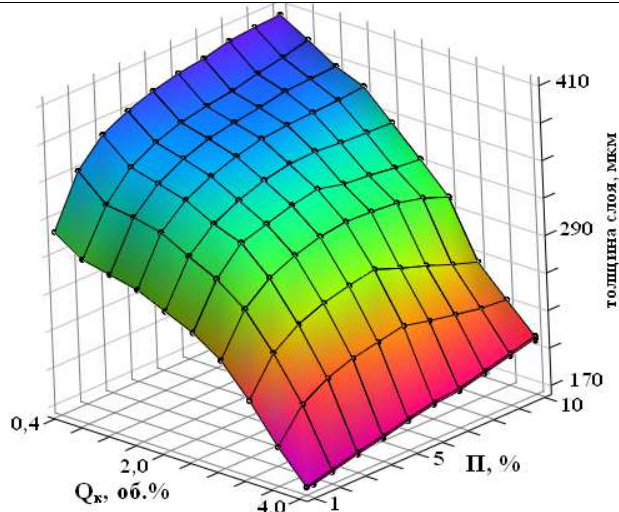


Рис. 3. Влияние содержания кислорода и количества пор в алюминиевых покрытиях на толщину слоя Al_2O_3 после микродугового оксидирования

Необходимо отметить, что используя факел с восстановительным пламенем ($\beta = 17...19$) и обеспечивая относительно высокую пористость напыленных покрытий варьируя дистанцией напыления и другими параметрами, удалось после микродугового оксидирования получить на покрытиях слой оксидов толщиной до 400 мкм, что не удалось достичь при оксидировании литых алюминиевых сплавов.

В проведенных ранее автором исследованиях фазового состава и дюрометрических свойств покрытий, полученных распылением проволок из сталей ферритного, аустенитного и мартенситного классов, было отмечено наличие аномально большого количества остаточного аустенита (до 50 об. %) в покрытиях из сталей мартенситного класса [11]. Установлена связь между методом нагрева проволоки перед распылением, температурой начала мартенситного превращения материала проволоки и количеством метастабильного аустенита, образующегося в сформированном покрытии.

Одной из наиболее вероятных причин появления «аустенитного эффекта» в покрытиях является относительно более высокая концентрация в них легирующих элементов (хрома и углерода) за счет полного растворения карбидов хрома при расплавлении проволоки и насыщения каплей расплава углеродом из пламени пропана. Об этом, в частности, свидетельствует отсутствие в покрытии частиц карбидов $Cr_{23}C_6$. Помимо этого, при анализе причин стабилизации аустенита в слое, необходимо иметь в виду, что при нанесении покрытия поверхностные слои композита разогреваются до температур 500–670 К. Вследствие чего напыленное покрытие в процессе его формирования и охлаждения проходит стадию изотермической выдержки при 520–670 К, что способствует термической стабилизации аустенита.

Проведенные исследования влияния состава горючей смеси на содержание углерода и кислорода в покрытиях показали, что дополнительным фактором, увеличивающим устойчивость аустенита в напыленных слоях, выступает насыщение каплей расплава углеродом в процессе расплавления и распыления с использованием пламени пропана (таблица 2).

Относительно низкая скорость полета расплавленных частиц стали, а также высокая концентрация углеродсодержащего пропана в продуктах горения способствует более глубокому насыщению каплей расплава углеродом. Очевидно, что именно с этими обстоятельствами связано наиболее высокое содержание остаточного аустенита в покрытиях, полученных по технологии газопламенного напыления.

Несколько меньшее количество аустенита в покрытиях, полученных методом гиперзвуковой металлизации в восстановительной атмосфере распыляющего факела обусловлено, по-видимому, существенно более высокой скоростью полета расплавленных частиц, характерной для данного способа напыления.

В этом случае процессы диффузионного насыщения каплей расплава углеродом из восстановительной атмосферы продуктов сгорания пропано-воздушной смеси пройти не успевают (время про-

лета расплавленных каплей в атмосфере продуктов сгорания не более $5 \cdot 10^{-4}$ с) и содержание остаточного аустенита в слое снижается до ≈ 20 об. %. Увеличение концентрации кислорода в смеси не сопровождается изменением количества остаточного аустенита в покрытии, полученном в условиях сверхзвуковых скоростей полета расплавленных частиц и при относительно более низких скоростях полета частиц (ГМ, чистый воздух). В обоих вариантах напыления содержание остаточного аустенита в слое не превышает 20 об. %. Вероятно, такое содержание остаточного аустенита в стали 40Х13 является равновесным для случая полного растворения в ней карбидов хрома и реализации присущих для ГН процесса условий охлаждения расплавленных каплей стали.

Таблица 2. Влияние состава горючей смеси, образующей распыляющий факел, на содержание углерода и кислорода в покрытиях из стали 40Х13

Метод напыления; состав газов, образующих факел	Количество кислорода в покрытиях, %	Количество углерода в покрытиях, %
ГН, пропан – кислород, $\beta = 4$	1,3	0,6
ГМ, пропан – воздух, $\beta = 18$	1,4	0,5
ГМ, пропан – воздух $\beta = 30$	2,2	0,4
ГМ, чистый воздух	3,3 - 4,0	0,4

Исследования зависимости пористости покрытий из стали 95Х18МШ от дистанции напыления и расхода воздуха, подаваемого для образования факела в процессе гиперзвуковой металлизации, показали следующее (рисунок 4). Пористость покрытий резко возрастает при увеличении дистанции напыления свыше 200 мм, что особенно характерно для минимально допустимых расходов воздуха 1–1,5 м³/мин ($\beta = 17$). При увеличении расходов до максимальных значений ($\beta = 29$) пористость монотонно убывает. Минимальный расход определяется устойчивостью горения горючей смеси, максимальный – расходом горючего газа (пропана) из баллона. Дальнейшее увеличение расходов обеспечит рост качества покрытия, однако это потребует усложнения технологической схемы процесса для обеспечения необходимого расхода пропана, например, подачи пропана с рампы. При увеличении дистанции напыления свыше 200 мм снижаются скорость и теплосодержание каплей. При ударе по этой причине ухудшаются условия растекания жидкого металла капли по поверхности, что обуславливает повышение пористости покрытия.

Таким образом, проведенные исследования показали, что наиболее плотные покрытия с допустимым количеством оксидов в процессе гиперзвуковой металлизации высоколегированных сталей образуются при использовании пропано-воздушной смеси с избытком пропана ($\beta = 18–20$), расходом воздуха в смеси $Q = 1,75–2$ м³/мин., дистанциях напыления $L = 150–200$ мм.

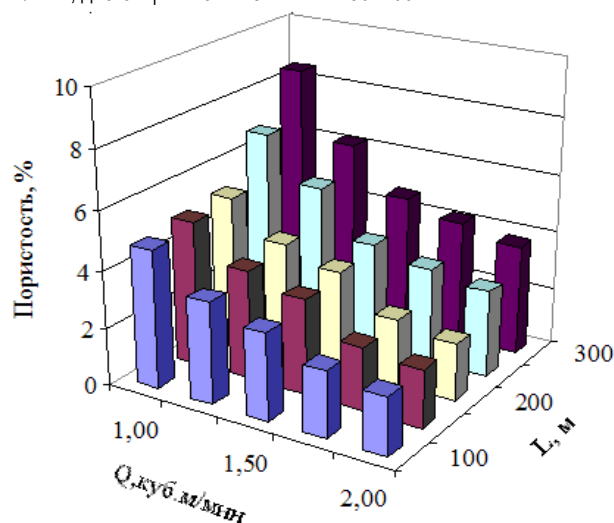


Рис. 4. Зависимость пористости покрытий из стали 95Х18МШ от расхода воздуха (Q) и дистанции напыления (L)

Таблица 3. Свойства покрытий из стали 40X13 и толщина формируемого на них азотированного слоя в зависимости от состава газовой смеси факела и давления подаваемого в смесь воздуха

Состав газовой смеси факела (β)	Давление воздуха, МПа	Размер распыленных частиц, мкм	К-во кислорода в покрытии, %	Пористость покрытий, %	Толщина азотированного слоя, мкм
1:16	0,45	10–25	0,6	6–8	30–35
1:18	0,45	10–25	0,8	≤ 5	30–35
1:19	0,45	10–20	1,1	≤ 5	30–35
1:22	0,45	10–25	1,4	< 5	25–30
1:25	0,45	5–15	1,9	< 5	20–25
1:28	0,45	5–15	2,2	< 5	20–25
1:17	0,11	65–80	0,7	11–13	55–70
1:17	0,12	60–75	0,7	6–8	55–60
1:17	0,13	55–65	0,7	5–7	50–60
1:17	0,15	55–60	0,7	≤ 5	50–55
1:17	0,16	50–55	0,7	≤ 5	50–55
1:17	0,17	45–50	0,7	< 5	45–50

В настоящее время для повышения физико-механических свойств стальных газотермических покрытий используются различные методы последующей термообработки или модифицирования, в том числе ионно-лучевое азотирование [12]. Данная технология обеспечивает достаточно высокие механические и адгезионные характеристики покрытий, получаемых газопламенным проволочным напылением и гиперзвуковой металлизацией, однако основным недостатком является небольшая толщина имплантированного слоя (до 15–18 мкм), обусловленная наличием большого количества окислов, а также малым размером распыленных частиц (1–25 мкм). Это обстоятельство значительно ограничивает область рационального использования процесса ионно-лучевого азотирования стальных покрытий.

Процесс гиперзвуковой металлизации осуществляют, как правило, при давлении воздуха от 0,45 до 0,55 и соотношении пропана и воздуха от 1:23 до 1:29 [1], поскольку максимальные скорость истечения и температура пропано-воздушного факела достигаются при соотношении пропана и воздуха от 1:25 до 1:28. Однако при этом в смеси находится достаточно большое количество воздуха, обуславливающего интенсивное окисление расплавленного металла проволоки. Задачей последующих исследований явилось определение режимов напыления, позволяющих уменьшить степень окисления распыленных частиц.

При повышении размера распыляемых частиц увеличиваются области в покрытии, лишенные оксидных пленок, которые появляются на границах частиц, упавших на поверхность изделия. А уменьшение степени окисления снижает толщину оксидных пленок на частицах и, соответственно, снижает величину барьера для диффузии атомов азота. Эти условия необходимы только при напылении поверхностных слоев покрытия – самый верхний удаляется механической обработкой, а последующий используется для имплантации азотом. Остальное покрытие необходимо напылять на режимах, обеспечивающих мелкий распыл при высокой скорости полета частиц, что позволяет получить необходимые физико-механические свойства основного материала покрытия.

Экспериментальные исследования осуществлялись при распылении проволоки из стали 40X13. Ионно-лучевая обработка осуществлялась на экспериментальной установке, оснащенной ионным источником УВН-2М. Плотность тока ионного пучка – 2 мА/см², время обработки – 3 часа. Концентрацию кислорода в покрытиях определяли с помощью локального микрорентгеноспектрального анализатора «VEGA 3M». Металлографические исследования осуществлялись на сканирующем электронном микроскопе TESCAN Vega 3LMH и оптическом универсальном микроскопе Altam Met 1MT. Объемная пористость покрытий определялась методом планиметрии, реализованном в прикладном пакете AxioVizion применительно к микроскопу Altam Met 1MT. Результаты экспериментов приведены в таблице 3.

Анализ выполненных исследований показал (таблица 3), что снижение количества воздуха до соотношений от 1:16 (нижний порог горения пропана) до 1:18 позволяет в 2,1–2,5 раза уменьшить количество кислорода и оксидов в покрытии. При снижении давления воздуха с 0,35–0,55 МПа до 0,12–0,16 МПа размер распыленных частиц увели-

чился в 2,5 – 5 раз, что позволило повысить толщину азотированного слоя в 1,5–2 раза. Давление ниже 0,12 МПа применять нецелесообразно, поскольку это приводит к резкому повышению пористости покрытий, а соответственно и снижению механических характеристик.

Заключение. Анализ результатов проведенных исследований влияния содержания окислителя и пропана в факеле термораспылителей на свойства газотермических покрытий показал целесообразность изменения состава горючей смеси в ходе технологического процесса.

При газопламенном напылении полимерных термопластичных материалов предложено осуществлять нанесение предварительного слоя, обеспечивающего адгезию покрытия, порошком с размером частиц менее 60 мкм в окислительном пламени (при соотношении воздуха и пропана в смеси от 24/1 до 32/1), основное покрытие напылять порошком с размером частиц 100–300 мкм в нормальном пламени (при соотношении воздуха и пропана в смеси от 20/1 до 24/1), а оплавление покрытия производить при соотношении воздуха и пропана в смеси от 16/1 до 20/1.

В процессе нанесения коррозионностойких покрытий распылением алюминиевой проволоки продуктами сгорания пропано-воздушной смеси, первый слой необходимо наносить факелом, содержащем избыток пропана (восстановительным пламенем), а последующие – окислительным пламенем. В случае применения после нанесения алюминиевого покрытия технологии микродугового оксидирования, процесс напыления необходимо осуществлять только восстановительным пламенем.

Для обеспечения возможности образования большого количества остаточного аустенита в покрытиях, получаемых при распылении проволоки из сталей мартенситного класса необходимо первый (адгезионный) слой напылять нормальным пламенем, а последующие – восстановительным пламенем. Аналогичным образом необходимо осуществлять процесс нанесения стального покрытия перед последующим модифицированием имплантацией азотом.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Белоцерковский, М.А. Активированное газопламенное и электродуговое напыление покрытий проволочными материалами / М.А. Белоцерковский, А.С. Прядко // Упрочняющие технологии и покрытия (РФ). – 2006. – № 12. – С. 17–23.
2. Белоцерковский, М.А. Рациональное активирование процессов газопламенного напыления металлов и полимеров / М.А. Белоцерковский // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В: Промышленность, прикладные науки. – 2014. – № 3. – С. 22–28.
3. Витязь, П.А. Замена гальванического хромирования на технологию гиперзвуковой металлизации при ремонте деталей узлов трения скольжения / П.А. Витязь, М.А. Белоцерковский, А.И. Камко, А.С. Прядко // Ремонт, восстановление, модернизация (РФ). – 2010. – № 10. – С. 2–5.
4. Белый, В.А. Полимерные покрытия / В.А. Белый, В.А. Довгяло, О.Р. Юркевич. – Минск, 1976. – 416 с.

- Щетинков, Е.С. Физика горения газов / Е.С. Щетинков. – Москва: Наука, 1965. – 476 с.
- Нинбург, А.К. Газопламенная обработка металлов с использованием газов-заменителей ацетилена / А.К. Нинбург. – Москва: Машиностроение, 1976. – 152 с.
- Белый, В.А. Полимерные покрытия / В.А. Белый, В.А. Довгало, О.Р. Юркевич. – Минск, 1976. – 416 с.
- Способ нанесения покрытия порошком термoplastического полимера: пат. 8528 Респ. Беларусь, МПК В 05 D 1/08 / М.А. Белоцерковский, А.В. Голопятин, М.А. Леванцевич, А.М. Гоман; заявитель ИМИНМАШ НАН Беларуси. – № а 20040210; заявл. 16.03.2004; опубл. 30.10.2006.
- Способ получения коррозионностойкого покрытия: пат. 18329 Респ. Беларусь, МПК В05В 7/20 / М.А. Белоцерковский, В.В. Рудый, А.С. Прядко, В.В. Дук, А.В. Сосновский, В.В. Крейнин; заявитель ИМИНМАШ НАН Беларуси. – № а 20120916; заявл. 12.06.2012; опубл. 10.03.2014.
- Малышев, В.Н. Особенности формирования покрытий методом анодно-катодного микродугового окисления / В.Н. Малышев // Защита металлов. – 1996. – Т. 32, № 6. – С. 662–667.
- Басинюк, В.Л. Разработка технологии и применение многослойных комбинированных покрытий на основе оксидокерамики / В.Л. Басинюк, М.А. Белоцерковский // Трение и износ. – 2003. – Т. 24, № 2. – С. 203–209.
- Белоцерковский, М.А. Структурные аномалии в стальных газотермических покрытиях и возможности их использования / М.А. Белоцерковский // Упрочняющие технологии и покрытия (РФ). – 2008. – № 10. – С. 39–44.
- Кукареко, В.А. Влияние ионно-лучевого азотирования на структурно-фазовое состояние и триботехнические свойства экономичных газотермических покрытий из проволоочных сталей различных классов / В.А. Кукареко, А.В. Белый, М.А. Белоцерковский, А.Н. Григорчик // Трение и износ. – 2013. – Т. 34, № 6. – С. 621–627.

Материал поступил в редакцию 09.01.15

BELOTSEKOVSKY M.A. Influence of the ratio of gases forming the torch in thermal spraying processes on coatings properties

Results on the effect the amount of oxidant and propane in thermal torch on the properties of spraying coatings are given. It has been shown that it is expedient to change the composition of the combustible mixture during the process.

УДК: 535.14+621.373.826

Лещик С.Д., Зноско К.Ф., Калугин Ю.К.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТИЦ, ГЕНЕРИРОВАННЫХ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИЕЙ ТВЕРДЫХ ТЕЛ В ЖИДКОСТИ

Введение. Эффективные методы получения наночастиц в настоящее время представляют значительный практический интерес. Такой интерес обусловлен тем, что наноразмерные объекты зачастую по своим свойствам отличаются от микро- и макроскопических объектов из того же материала [1]. Это позволяет создавать объекты с иными свойствами из тех же самых атомов. Другой важный фактор заключается в том, что из всего числа атомов доля, находящаяся на поверхности наночастицы, велика. При этом может меняться взаимодействие атомов как между собой, так и с внешней средой. В настоящее время наноматериалы применяются в медицине, машиностроении, электронике. Зачастую это суспензии на основе различных жидкостей. Несомненно, практический интерес представляют методы генерации наночастиц непосредственно в заданной жидкой среде. Одним из таких методов является импульсная лазерная абляция (ИЛА) твердофазных материалов в жидкости. Технологические возможности современных лазерных установок позволяют обеспечить точную дозировку излучения по энергии в импульсе и длительности импульса, что дает широкие возможности применения процесса лазерной абляции в медицине, научной сфере, промышленности. При этом с целью получения наночастиц из того же вещества, что и мишень, следует подбирать жидкость таким образом, чтобы исключить их взаимодействие в процессе абляции. Не менее важна при этом воспроизводимость характеристик частиц, а также возможность контроля и регулирования процесса их получения. Рядом авторов изучалась абляция металлов (золото, серебро, медь, латунь, железо) в жидкостях оптически прозрачных в видимом диапазоне (дистиллированная вода, спирт, ацетон и др.) [2–5]. В меньшей степени в литературе нашли отражение вопросы абляции неметаллических материалов [6, 7] и моделирования процессов абляции [8, 9]. Данные о влиянии технологических параметров про-

цесса абляции на характеристики образующихся частиц встречаются мало и не систематизированы. Все это обосновывает актуальность разработки теоретических и технологических основ формирования наноструктур методом импульсной лазерной абляции твердофазных материалов в жидких средах. Целью данной работы явилось исследование частиц, полученных методом лазерной абляции твердофазных материалов в жидких средах в режиме наносекундных импульсов.

Материалы, методы и техника эксперимента. В качестве материала мишени использовали графит марки МГ-1 ОСЧ по ТУ 48-20-90-82, промышленный политетрафторэтилен (ПТФЭ) марки Ф-4 по ГОСТ 10007-80. Для обеспечения равномерного воздействия лазерного излучения на поверхность мишени шероховатость образцов обеспечивали не хуже R_a 1,6 мкм.

В качестве жидкости, в которой находились образцы при проведении абляции, использовали дистиллированную воду и этанол (96%).

Для проведения абляции твердофазных веществ в жидкости использовали установку, принципиальная схема которой приведена на рисунке 1. Лазерное излучение от ND:YAG лазера с модулированной добротностью резонатора фирмы «LOTIS TII», расположенного на горизонтальном экспериментальном столе, проходило через плоскопараллельную пластину и попадало на призму полного внутреннего отражения, после которой направлялось вертикально вниз. Предварительно фокусируясь линзой, излучение лазера вводилось в кювету с жидкостью, в которую помещен образец (мишень). Кювета располагалась на столике, который имел возможность перемещаться как в вертикальном направлении, так и в горизонтальной плоскости. С его помощью, при необходимости, можно управлять положением кюветы и оптимальным расположением образца относительно лазерного луча как в автоматическом режиме, так и вручную.

Лещик Сергей Дмитриевич, к.т.н., доцент, зав. кафедры машиноведения и технической эксплуатации автомобилей УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купаль».

Зноско Казимир Францевич, доцент кафедры лазерной физики и спектроскопии УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купаль».

Калугин Юрий Константинович, доцент кафедры машиноведения и технической эксплуатации автомобилей УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купаль».

Беларусь, ГрГУ им. Я. Купаль, 230023, г. Гродно, ул. Э. Ожешки, 22.