



# МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 621.793

М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ, д-р техн. наук, доц.

заведующий лабораторией газотермических методов упрочнения деталей машин

E-mail: mbelotser@gmail.com

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 24.01.2019.

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ ГИПЕРЗВУКОВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ ПРИ РАСПЫЛЕНИИ ПРОВОЛОК ИЗ РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

*В статье приведены результаты исследования процесса гиперзвуковой металлизации (ГМ) покрытий из разнородных металлов. Определены приемы получения методом ГМ псевдосплавов «сталь — цинк» и «сталь — бронза». Исследована твердость и износостойкость покрытий, полученных распылением высокохромистых сталей мартенситного и аустенитного классов.*

**Ключевые слова:** газотермические покрытия, гиперзвуковая металлизация, псевдосплавы, стали мартенситного и аустенитного классов

**Введение.** Применение композитов позволяет получать изделия с уникальными свойствами, а именно: высокой твердостью, износостойкостью и теплостойкостью, а также повышенным или пониженным значением коэффициента трения и т. д. Вместе с тем производство композитов является весьма сложным и трудоемким процессом. Например, их получение традиционными методами порошковой металлургии и литья включает в себя ряд сложных энергозатратных процессов, существенно повышающих стоимость получаемого материала. Таким образом, разработка эффективных и более дешевых методов получения композитов является актуальной задачей.

Композиционное газотермическое покрытие — это гетерофазное покрытие, сформировавшееся в процессе нанесения, со структурой и свойствами, присущими композиционному материалу. Анализ процессов газотермического напыления (ГТН), структуры и физико-механических свойств композиционных покрытий показывает ряд преимуществ таких систем, в особенности высокую прочность, плотность, однородность, наличие фаз с особыми свойствами. Отдельным видом композиционных покрытий являются покрытия с псевдосплавной структурой, состоящие из материалов, которые не образуют твердых растворов и соединений в жидком и твердом состоянии (отличаются

температурой плавления, не сплавляются между собой). Благодаря отсутствию взаимодействия этих материалов в значительной области концентраций и температур псевдосплавные покрытия сочетают в себе свойства каждого из компонентов.

В литературе описаны методы электродуговой металлизации металлами с разной температурой плавления [1, 2]. Однако при этом покрытия формируются с большим количеством пор и низкой прочностью сцепления с основой, что обусловлено относительно небольшой (не более 120 м/с) скоростью распыляющей воздушной струи. Кроме того, нестабильное горение дуги между разнородными металлами проволок вызывает неравномерность процесса их распыления, что также отрицательно сказывается на качестве покрытий. Большинство указанных недостатков лишен способ получения покрытия гиперзвуковой металлизацией (ГМ) [3], обеспечивающий формирование высокоплотных покрытий с прочностью сцепления на отрыв до 60 МПа.

Принимая во внимание высокую производительность метода ГМ, а также возможность формировать покрытия из разных токопроводящих материалов, представляло интерес получение псевдосплавных композиционных покрытий, являющихся типичными мультимодальными композитами (формируются частицами различного

размера, зависящего от вязкости распыляемого металла), и исследовать их структурные особенности. Разработке технологических рекомендаций по нанесению покрытий методом ГМ распылением проволок из разнородных материалов посвящена данная статья.

**Методика исследований.** Для исследования процесса формирования псевдосплавных покрытий гиперзвуковой металлизацией использовалась установка АДМ-10 и проволоки различных диаметров из стали мартенситного класса 40X13, стали аустенитного класса 12X18H10T, бронзы БрАЖ9-4, цинка Ц1, алюминия АМг3. В качестве горючего газа для формирования распыляющего факела использовался пропан. Электрические параметры металлизации, а также давление пропана и воздуха, подаваемых в камеру сгорания и образующих реактивную распыляющую струю, соответствовали паспортным данным установки АДМ-10. В качестве образцов использовались пластины (50×50×5 мм) из стали 45. После напыления поверхность псевдосплава подвергалась механической шлифовке с финишной доводкой на абразивной бумаге Р 320.

Сплошность, поверхностную пористость покрытий определяли на микроскопе Polyvar с помощью программного комплекса Autoscan. Исследование фазового состояния осуществляли на дифрактометре ДРОН-2.0 в монохроматизированном кобальтовом (СоК $\alpha$ ) излучении при напряжении 30 кВ и анодном токе 10 мА. Расшифровка рентгенограмм осуществлялась при помощи программного обеспечения Crystallographica Search-Match с картотекой PDF-2. Металлографические исследования проводились на оптическом микроскопе АЛЬГАМИ МЕТ 1МТ. Измерения твердости по Виккерсу проводились на твердомере DuraScan 20 при нагрузке на индентор  $P = 10$  г и 10 кг.

Триботехнические испытания напыленных покрытий проводились на трибометре АТВП по схеме возвратно-поступательного движения контактирующих тел при средней скорости взаимного перемещения  $\approx 0,1$  м/с в режиме трения без смазочного материала (удельная нагрузка испытаний составляла  $p = 1,5$  МПа). При испытаниях использовалось контртело, изготовленное из закаленной стали У8 (800 HV10). Испытания проводились до момента достижения 20 000 циклов с промежуточными взвешиваниями. Путь трения составлял  $\approx 1200$  м.

**Результаты исследований.** Использование ранее найденных режимов процесса ГМ [4] при нанесении покрытий из разнородных металлов показало, что наблюдается неравномерность процесса распыления, особенно при использовании проволок одного диаметра с разными теплофизическими и реологическими свойствами образующейся жидкой фазы. Это приводит к появлению дефектных участков покрытия, образующихся из разных

по размеру капель, а также участков с меньшим содержанием более тугоплавкого материала. Кроме того, в ходе экспериментальных исследований процесса было замечено, что при подключении проволоки из более тугоплавкого металла к положительному потенциалу сварочного источника, использующегося в установке ГМ, равномерность распыления резко возрастает и достигает своего максимума при некотором увеличении диаметра легкоплавкой проволоки относительно тугоплавкой. Это, вероятней всего, происходит потому, что с катода испускается поток электронов, который переносится на анод. В результате соударения электронов с ионами металла анода и происходит большее тепловыделение, чем на катоде [5].

Результаты исследований приведены в таблице 1. Проволока, отмеченная в графе «тугоплавкий материал», подключалась к положительному полюсу сварочного источника ВДУ-506.

В ходе анализа полученных результатов были выделены три характерные группы режимов напыления и качества покрытий. В первую входили покрытия, формирование которых происходило при отсутствии стабильности процесса металлизации (перерывы, «плевки» металла). Покрытия наносились неравномерно, поверхностная пористость находилась в пределах от 3 до 10 %, размер открытых пор составил от 8 до 30 мкм.

У следующей группы покрытий процесс нанесения прерывался через каждые 8–12 с, возобновляясь вновь, но при этом на покрытии образовывались дефектные участки (наплывы) из больших кусков (от 40 до 100 мкм) расплавленного материала проволоки.

Третья группа характеризовалась стабильностью процесса гиперзвуковой металлизации, равномерностью формирования покрытий, низкой пористостью ( $\leq 3$  %).

При математической обработке результатов, отмеченных в третьей группе, получена эмпирическая зависимость между диаметром распыляемых проволок и их температурой плавления, которая описывается выражением

$$d_n = d_t (T_t/T_n)^{0,25}, \quad (1)$$

где  $d_n$ ,  $T_n$  — диаметр (мм) и температура плавления (°С) проволоки из более легкоплавкого материала;  $d_t$ ,  $T_t$  — диаметр (мм) и температура плавления (°С) стальной проволоки.

Отмечено также, что при распылении только сжатым воздухом (схема традиционной электродуговой металлизации) диапазон диаметров проволок, обеспечивающих стабильный процесс, значительно расширяется. Это можно объяснить большей «чувствительностью» процесса гиперзвуковой металлизации, обусловленной высокими динамическими параметрами струи.

Проверку полученных результатов в реальных условиях эксплуатации деталей осуществляли

Таблица 1 — Используемые в исследованиях материалы и результаты, полученные при ГМ  
Table 1 — Materials used in research and results obtained with HM

№	Материал тугоплавкой проволоки	Диаметр тугоплавкой проволоки, мм	Материал легкоплавкой проволоки	Диаметр тугоплавкой проволоки, мм	Результаты металлизации, качество покрытия
1	сталь	2,0	алюминий	1,6	Имеются дефектные участки покрытия
2		2,0		2,0	
3		2,0		2,4	<b>Процесс стабилен, качество покрытий хорошее</b>
4		2,0		2,5	Имеются дефектные участки покрытия
5		1,6		1,8	
6		1,6		2,0	<b>Процесс стабилен, качество покрытий хорошее</b>
7		2,0		2,0	Процесс не стабилен
8		2,0	бронза	2,0	<b>Процесс стабилен, качество покрытий хорошее</b>
9		2,0		2,2	
10		2,0		2,5	Процесс не стабилен
11		1,8		2,0	<b>Процесс стабилен, качество покрытий хорошее</b>
12		1,8		2,2	Имеются дефектные участки покрытия
13		2,0		цинк	1,8
14		2,0	2,0		
15		2,0	2,5		<b>Процесс стабилен, качество покрытий хорошее</b>
16		1,6	1,8		Имеются дефектные участки покрытия
17		1,6	2,0		<b>Процесс стабилен, качество покрытий хорошее</b>
18	бронза	2,0	алюминий	1,6	Процесс не стабилен
19		2,0		1,8	Имеются дефектные участки покрытия
20		2,0		2,0	
21		2,0		2,2	<b>Процесс стабилен, качество покрытий хорошее</b>
22		2,0	2,5	Имеются дефектные участки покрытия	
23		1,8	2,0	<b>Процесс стабилен, качество покрытий хорошее</b>	
24		1,8	2,5	Имеются дефектные участки покрытия	
25		2,0	1,8		
26		2,0	2,0	Процесс не стабилен	
27		2,0	2,2		
28	2,0	2,5			
29	алюминий	2,0	цинк	2,0	Имеются дефектные участки покрытия
30		2,0		2,2	<b>Процесс стабилен, качество покрытий хорошее</b>
31		2,0		2,5	Процесс не стабилен
32		1,8		2,5	
33		1,8	2,0	<b>Процесс стабилен, качество покрытий хорошее</b>	
34		1,8	1,8	Имеются дефектные участки покрытия	
35		1,6	1,8	<b>Процесс стабилен, качество покрытий хорошее</b>	
36		1,6	2,0	Имеются дефектные участки покрытия	

нанесением композиционных покрытий «сталь — цинк» на рабочие поверхности стрясных досок зерноуборочных комбайнов.

Для обеспечения требуемой работоспособности поверхности стрясной доски комбайнов для уборки трав и зерновых, которая контактирует с ворохом, зеленой массой, потоками зерна и т. п. необходимо наносить защитное износостойкое покрытие, которое должно обладать, с одной стороны, определенными гидрофобными характеристиками и коррозионной стойкостью, а с другой — высокой стойкостью к гидроабразивному изнашиванию. То есть, с одной стороны, иметь

износостойкость стали, а с другой — показатели смачиваемости оцинкованной поверхности (краевой угол смачивания составляет около 110°).

На выбранные два участка (каждый размером 250×100 мм) рабочей поверхности доски стрясной ступенчатой КЗК-12-0280441 кормо- и зерноуборочного тракта комбайна типа КЗС-10, выполненной из стали 20, наносили методом гиперзвуковой металлизации покрытие распылением проволок из стали 40Х13 и цинка. Подготовка поверхности осуществлялась обезжириванием и последующим крацеванием с помощью стальной дисковой щетки с диаметром проволочного ворса 0,6 мм.

На первый участок напыляли покрытие по ранее используемой технологии гиперзвуковой металлизации. Режимы напыления: диаметр напыляемых проволок — сталь 40X13,  $d = 2,0$  мм; цинк Ц1,  $d = 2,0$  мм; анод — цинковая проволока, катод — стальная проволока; расход сжатого воздуха —  $Q_v = 70$  м<sup>3</sup>/ч; расход пропан-бутана —  $Q_n = 0,3$  м<sup>3</sup>/ч; давление сжатого воздуха —  $P_v = 0,5$  МПа; давление пропана —  $P_n = 0,45$  МПа; напряжение на дуге —  $U_d = 34$  В; ток дуги —  $I_d = 150$  А; скорость движения газов в распыляющем факеле (определено прибором ИССО-1) — 1350–1400 м/с; дистанция напыления —  $L_m = 90–95$  мм. Процесс напыления сопровождался частым срывом дуги, покрытие формировалось неравномерно, имелись участки, образованные крупными каплями цинка. На поверхности имелись поры диаметром от 20 до 50 мкм.

На второй участок напыляли покрытие, используя предложенный выше технологический прием (к более тугоплавкой проволоке подводить положительный потенциал, а диаметр более легкоплавкой проволоки выбирать, используя соотношение (1)). Режимы напыления: диаметр напыляемых проволок — сталь 40X13,  $d = 2,0$  мм; диаметр цинковой проволоки определяли с помощью выражения (1), он составил  $d = 2,6$  мм; в качестве анода, согласно заявляемому способу, была выбрана стальная проволока, катод — цинковая проволока; расходы и давление газов, электрические параметры, дистанция напыления те же, что и в предыдущем случае. Процесс нанесения проходил стабильно, без срывов дуги и хлопков. Плотность покрытия близка к 100 %.

С целью оперативного определения краевого угла смачивания было разработано и изготовлено устройство визуализации капли жидкости на поверхности исследуемых покрытий (рисунок 1) [6]. Устройство, изготовленное на базе цифрового микроскопа, позволяет получить снимок капли, соприкасающейся с исследуемой поверхностью. Для данного устройства разработана программа, позволяющая автоматически рассчитать значение угла смачивания капли.

Установлено, что у покрытия, нанесенного на первый участок, краевой угол смачивания ка-

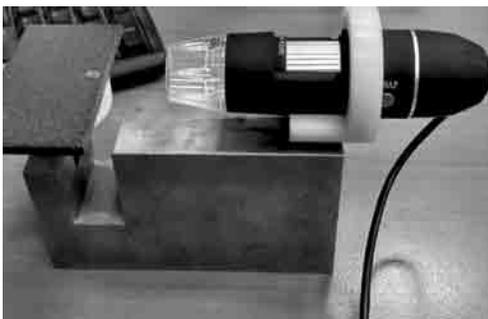


Рисунок 1 — Устройство визуализации капли на поверхности покрытия  
Figure 1 — Droplet imaging device on coating surface

пель из сока выжатого рапса на поверхности составил 85–90°. Краевой угол смачивания каплей из сока выжатого рапса на поверхности покрытия, полученного по предложенной технологии, составил 90–110°, что свидетельствует о его большей гидрофобности.

Исследована структура покрытий псевдосплава «сталь — цинк». Установлено, что покрытие формируется частицами стали размером от 10 до 25 мкм и цинка размером от 0,2 до 1,5 мкм. С помощью рентгенофлуоресцентного анализа исследован фазовый состав полученных покрытий, при этом отмечено появление гексагонального оксида цинка, обладающего свойствами твердой смазки (таблица 2).

На следующем этапе исследований были определены рациональные режимы формирования композиционных покрытий системы «сталь — медный сплав». Предполагалось, что одновременное распыление проволок из бронзы и стали позволит получить покрытие, обладающее большей износостойкостью, чем только бронза в условиях нагрузок более 5 МПа.

Для проверки этого предположения были выбраны следующие напыляемые проволоки: сталь 40X13 (ГОСТ 5632-72),  $d = 2,0$  мм; бронза БрАЖ 10-1,5 (ТУ 48-21-5047-84),  $d = 2,2$  мм. Расход сжатого воздуха  $Q_v = 90$  м<sup>3</sup>/ч; расход пропан-бутана  $Q_n = 0,3$  м<sup>3</sup>/ч; давление сжатого воздуха  $P_v = 0,6$  МПа; давление пропан-бутана  $P_n = 0,45$  МПа; напряжение на дуге  $U_d = 34$  В; ток дуги  $I_d = 200$  А; производительность напыления  $G_{pm} = 16,1$  кг/ч; скорость подачи

Таблица 2 — Химический состав покрытий на основе композита Zn + сталь 40X13, полученный методом рентгенофлуоресцентного анализа (рисунок 2)

Table 2 — Chemical composition of coatings based on composite Zn + steel 40Kh13, obtained by X-ray fluorescence analysis (Figure 2)

Элемент	Zn	Fe	Cr	Si	Mn	Ni	Cu	P	S
%	59,16	33,34	6,44	0,53	0,28	0,07	0,08	0,01	0,09

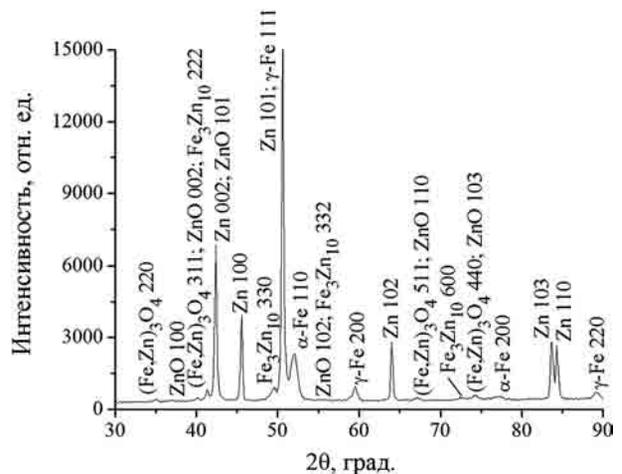


Рисунок 2 — Фрагмент рентгеновской дифрактограммы (CoKα) покрытия «сталь 40X13 + цинк»  
Figure 2 — Fragment of X-ray diffractogram (CoKα) of “steel 40Kh13 + zinc” coating

электродной проволоки  $V_{пр} = 5,59$  м/мин; скорость металлизации  $V_m = 0,07$  м/с; дистанция напыления  $L_m = 110$  мм; угол наклона оси металловоздушной струи к поверхности образца  $\alpha = 90^\circ$ ; угол наклона оси металловоздушной струи к направлению перемещения металлизатора  $\beta = 90^\circ$ ; толщина напыляемого слоя  $\delta_i \approx 0,7$  мм; количество проходов  $i = 3$ ; общая толщина покрытия  $\delta \approx 2,1$  мм.

Подготовка поверхности образцов осуществлялась следующим образом: образцы помещались в дробеструйную камеру КП-26.33.00.000; дробеструйная обработка поверхности детали (образца) осуществлялась колотой чугунной дробью ДЧК — 1,8 ГОСТ 11964-81 до полного исчезновения металлического блеска и появления пятна с характерным матовым цветом; по мере очистки дробеструйный пистолет равномерно передвигался; давление воздуха составляло от 0,6 МПа, расход воздуха — 5 м<sup>3</sup>/мин; расстояние от сопла дробеструйного пистолета до обрабатываемой поверхности составляло 85...95 мм; угол между струей абразива и поверхностью детали — 60–75°; срок годности подготовленной таким образом поверхности составлял 1,5–2,0 ч.

В отличие от покрытий из стали 40X13, полученное покрытие имело желтоватый цвет, практически не имело пор, а количество оксидов было ниже почти на 20 об. %.

Триботехнические испытания осуществлялись на трибометре АТВП по схеме возвратно-поступательного движения контактирующих тел при средней скорости взаимного перемещения  $\approx 0,1$  м/с в режиме трения со смазкой Литол 24 (удельная нагрузка испытаний составляла  $p = 10$  МПа). При испытаниях использовалось контртело, изготовленное из закаленной стали У8 (800 HV10).

После первой 1000 метров испытаний отмечено (рисунок 3), что линейный износ покрытия «сталь — бронза» составил около 6 мкм, при этом износ бронзового образца из бронзы БрАЖ 10-1,5 составил более 12 мкм. Дальнейшие испытания показали, что интенсивность изнашивания композиционного покрытия замедлилась и в среднем составила около 1,5 мкм/км. Интенсивность изнашивания литой бронзы составляла от 8 до 10 мкм/км.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что износостойкость композиционного мультимодального покрытия «сталь — бронза» в условиях трения скольжения со смазкой превышает износостойкость бронзы в 6–7 раз.

Следующий этап исследований был посвящен изучению свойств композиционных покрытий, формируемых одновременным распылением высокохромистых сталей мартенситного и аустенитного классов.

При газотермическом напылении псевдосплава, формируемого проволоками различного химического состава (40X13 и 12X18H10T), образуется покрытие, состоящее из напыленных частиц: от-

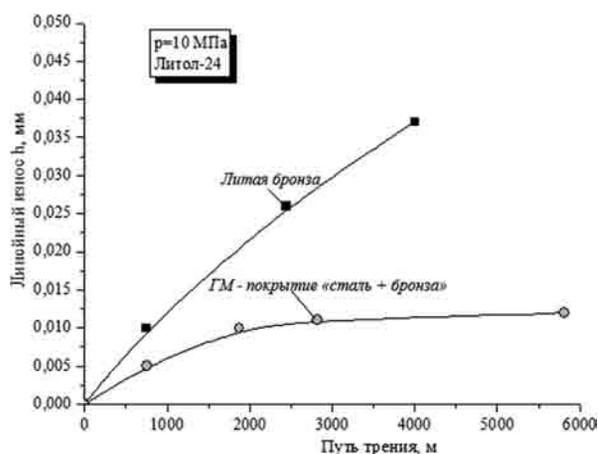


Рисунок 3 — Результаты триботехнических испытаний композиционного покрытия «сталь — бронза»  
Figure 3 — Results of tribotechnical tests of “steel-bronze” composite coating

дельных частиц из мартенситной и аустенитной стали, а также сплавленных частиц, имеющих разный химический состав. В частности, напыленные частицы псевдосплава могут иметь различное содержание углерода, хрома, никеля, железа и других легирующих элементов, что будет приводить к отличиям в их физико-механических свойствах. Усредненный химический состав напыленного гиперзвуковой металлизацией псевдосплава из высокохромистых сталей 40X13 и 12X18H10T представлен в таблице 3. Характерная микроструктура напыленного псевдосплава из высокохромистых сталей представлена на рисунке 4.

Фрагмент рентгеновской дифрактограммы от поверхностных слоев псевдосплава из высокохромистых сталей 40X13 и 12X18H10T представлен на рисунке 5. Анализ дифрактограммы показал, что фазовый состав псевдосплава включает в себя  $\gamma$ -Fe (60 об. %),  $\alpha$ -Fe (15 об. %), оксиды  $Fe_3O_4$  и FeO (25 об. %). Повышенное количество аустенита в газотермическом псевдосплаве связано с особыми условиями формирования покрытий при напылении [7], в результате которых протекает изотермическая выдержка напыляемых слоев при температурах, превышающих интервал мартенситного превращения. Кроме этого, дополнительная термическая стабилизация аустенитной фазы в псевдосплаве обеспечивается высоким содержанием в нем никеля (см. таблицу 3). Твердость напыленного псевдосплава составляет  $\approx 370$ –380 HV10, что близко к твердости газотермического покрытия из аустенитной стали 06X19H9T [8].

Таблица 3 — Усредненный химический состав напыленного псевдосплава  
Table 3 — Average chemical composition of deposited pseudo-alloy

Концентрация элементов, масс. %						
C	Cr	Ni	Ti	Mn	Si	Fe
0,2–0,3	15,7	3,97	—	0,75	0,44	основа

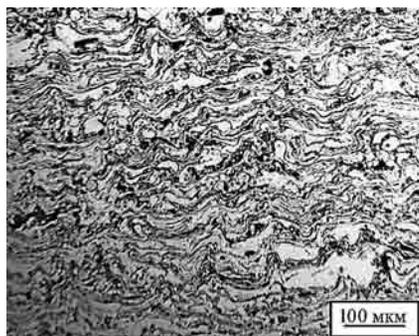


Рисунок 4 — Характерная микроструктура псевдосплава из высокохромистых сталей 40X13 и 12X18N10T, полученного методом гиперзвуковой металлизации  
Figure 4 — Typical microstructure of pseudoalloy of high-chromium steels 40Kh13 and 12Kh18N10T obtained by hypersonic metallization

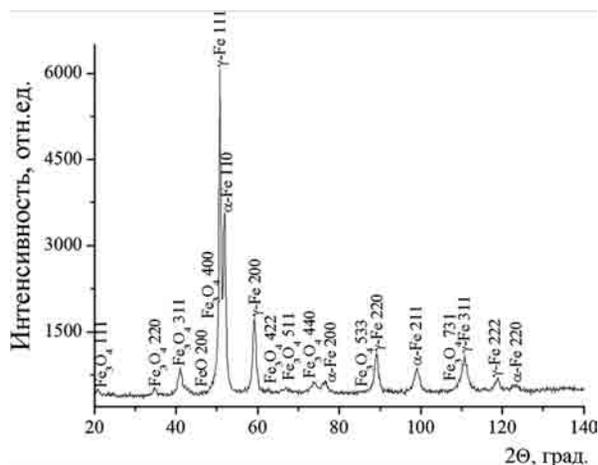


Рисунок 5 — Фрагмент рентгеновской дифрактограммы (CoKα) от поверхностных слоев псевдосплава из высокохромистых сталей 40X13 и 12X18N10T, полученного методом гиперзвуковой металлизации  
Figure 5 — Fragment of X-ray diffractogram (CoKα) from surface layers of pseudo-alloy of high-chromium steels 40Kh13 and 12Kh18N10T obtained by hypersonic metallization

Результаты триботехнических испытаний псевдосплава из высокохромистых сталей в условиях трения без смазочного материала представлены на рисунке 6. Кроме того, там же приведены зависимости массового износа от пути трения для газотермических покрытий из сталей 40X13 и 06X19Н9Т [8].

Полученные данные (см. рисунок 6) свидетельствуют о том, что износостойкость псевдосплава из высокохромистых сталей 40X13 и 12X18N10T приблизительно в 3,8 и 12,0 раз выше, чем у газотермических покрытий из сталей 40X13 и 06X19Н9Т соответственно. При этом интенсивность массового изнашивания полученного гиперзвуковой металлизацией псевдосплава составляет  $\approx 1,2 \cdot 10^{-3}$  мг/м. В процессе фрикционного взаимодействия снижается содержание аустенитной фазы в поверхностных слоях псевдосплава приблизительно до 45 об.%, а его микротвердость возрастает приблизительно до 850 HV0,01. Высокая износостойкость псевдосплава из двух сталей 40X13 и 12X18N10T достигается за счет деформационно-активированного  $\gamma \rightarrow \alpha$

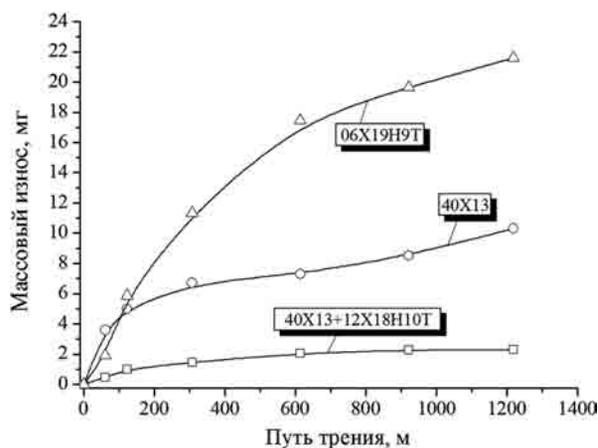


Рисунок 6 — Зависимости массового износа от пути трения для газотермических покрытий из сталей различных классов, а также псевдосплава из высокохромистых сталей  
Figure 6 — Dependences of mass wear on friction path for gas-thermal coatings of steels of different grades, as well as pseudo-alloy of high-chromium steels

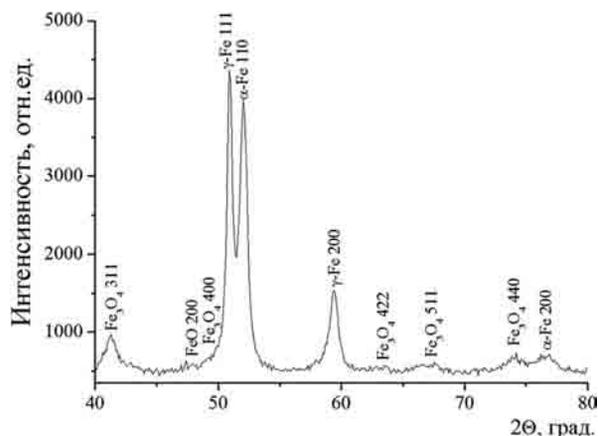


Рисунок 7 — Фрагмент рентгеновской дифрактограммы (CoKα) от поверхностных слоев псевдосплава из высокохромистых сталей 40X13 и 12X18N10T, полученного методом гиперзвуковой металлизации, после трения без смазочного материала при 1,5 МПа  
Figure 7 — Fragment of X-ray diffractogram (CoKα) from surface layers of pseudo-alloy of high-chromium steels 40Kh13 and 12Kh18N10T obtained by hypersonic metallization after friction without lubricant at 1.5 MPa

превращения, протекающего в процессе трения в поверхностных слоях покрытия (рисунок 7), а также за счет деформационного упрочнения  $\gamma$ -фазы и возможного ее насыщения азотом в процессе напыления. Кроме этого, повышенные триботехнические свойства псевдосплава обеспечиваются наличием в нем частиц из мартенситной стали 40X13, которые обуславливают более высокую прочность покрытия. В частности, для случая трения без смазочного материала газотермического покрытия из аустенитной стали 06X19Н9Т, содержащего близкое количество  $\gamma$ -фазы ( $\approx 68$  об.%), регистрируется повышенный износ, обусловленный низкими прочностными свойствами напыленных частиц.

**Заключение.** Предложен метод получения композиционных покрытий из псевдосплава Zn + сталь 40X13 методом гиперзвуковой металлизации, заключающийся в подключении анода источника

питания установки ГМ к стальной проволоке, а катода — к цинковой проволоке, при этом диаметр цинковой проволоки выбирали в 1,3 раза больше, чем стальной. Процесс нанесения проходил стабильно, без срывов дуги и хлопков. Плотность покрытия близка к 100 %. Установлено, что покрытие формируется частицами стали размером от 10 до 25 мкм и цинка размером от 0,2 до 1,5 мкм.

В результате исследования гидрофобных свойств мультимодальных покрытий «сталь — цинк» установлено, что краевой угол смачивания капель на их поверхности составил 90–110°, что близко значениям этого показателя у оцинкованных стальных листов (110°).

Триботехническими испытаниями установлено, что износостойкость композиционного мультимодального покрытия «сталь — бронза» в условиях трения скольжения со смазкой при удельной нагрузке 10 МПа превышает износостойкость литой бронзы в 6–7 раз.

Исследовано структурно-фазовое состояние и трибомеханические свойства композита из высокохромистых сталей 40X13 и 12X18H10T, полученного гиперзвуковой металлизацией. Установлено, что псевдосплав содержит аномально высокое количество  $\gamma$ -фазы ( $\approx 60$  об. %), что связано с повышенным содержанием в нем никеля, обеспечивающего термическую стабилизацию аустенитной фазы, а также особыми условиями формирования газотермических покрытий.

Показано, что композиционное покрытие из высокохромистых сталей 40X13 и 12X18H10T, полученное гиперзвуковой металлизацией, характеризуется сравнительно невысокой твердостью 370–380 HV10 и повышенной износостойкостью в режиме трения без смазочного материала. При этом интенсивность массового изнашивания газотермического композита составляет  $1,2 \cdot 10^{-3}$  мг/м,

что в 3,8 и 12,0 раз ниже, чем у газотермических покрытий из сталей 40X13 и 06X19H9T соответственно. Высокая износостойкость достигается за счет протекания в поверхностных слоях псевдосплава деформационно-активированного  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения, придающего им повышенную микротвердость и износостойкость, а также за счет деформационного упрочнения  $\gamma$ -фазы.

### Список литературы

1. Size distribution of particles from individual wires and the effects of nozzle geometry in twin wire arc spraying / H.L. Liao [et al.] // Surface and Coatings Technology. — 2005. — Vol. 200, No. 7. — Pp. 2123–2130.
2. Вигилянская, Н.В. Газотермическое напыление псевдосплавных покрытий (обзор) / Н.В. Вигилянская, Ю.С. Борисов, И.А. Демьянов // Автоматическая сварка. — 2012. — № 1. — С. 48–55.
3. Выбор технологических параметров процесса нанесения стальных покрытий методом гиперзвуковой металлизации / М.А. Белоцерковский [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. — 2015. — № 3(32). — С. 52–57.
4. Белоцерковский, М.А. Использование гиперзвуковой металлизации при ремонте штоков гидроцилиндров / М.А. Белоцерковский, А.П. Яловик // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр.; в 3 кн. / ФТИ НАН Беларуси; редкол.: С.А. Астапчик [и др.]. — 2016. — Кн. 2. Технология и оборудование механической и физико-технической обработки. — С. 29–33.
5. Мотяхов, М.А. Электродуговая сварка металлов / М.Ф. Мотяхов. — М.: Высш. шк., 1975. — 232 с.
6. Технология нанесения полимерных покрытий с повышенными гидрофобными свойствами / М.А. Белоцерковский [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — 2018. — Вып. 7. — С. 357–359.
7. О природе формирования метастабильной аустенитной структуры при газотермическом напылении высокохромистой стали мартенситного класса 95X18 / В.А. Кукарко [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2017. — Т. 13, № 7(151). — С. 318–322.
8. Структурно-фазовое состояние и износостойкость в условиях граничного трения обработанных ионами азота газотермических покрытий из сталей различных классов / В.А. Кукарко [и др.] // Трение и износ. — 2015. — Т. 36, № 6. — С. 661–670.

BELOTSEKOVSKY Marat A., D. Sc. in Eng., Assoc. Prof.

Head of the laboratory of Gas-Thermal Methods of Machine Components Hardening

E-mail: mbelotser@gmail.com

Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 24 January 2019.

## TECHNOLOGICAL METHODS OF HYPERSONIC METALLIZATION WITH SPRAYING WIRES FROM DISSIMILAR METALS

*The article presents the results of the study of hypersonic metallization (HM) process of coatings of dissimilar metals. The methods for producing “steel — zinc” and “steel — bronze” pseudo-alloys using HM are defined. The hardness and wear resistance of coatings obtained by spraying high-chromium steels of martensitic and austenitic grades are investigated.*

**Keywords:** gas-thermal coatings, hypersonic metallization, pseudo-alloys, austenitic and martensitic steel grades

## References

1. Liao H.L., et al. Size distribution of particles from individual wires and the effects of nozzle geometry in twin wire arc spraying. *Surface and Coatings Technology*, 2005, vol. 200, no. 7, pp. 2123–2130.
2. Vigilyanskaya N.V., Borisov U.S., Demyanov I.A. Gazotermicheskoe napylenie psevdosplavnykh pokrytiy (Obzor) [Thermal spraying of pseudo-alloy coatings (Overview)]. *Avtomaticheskaya svarka* [Automatic welding], 2012, no. 1, pp. 48–55.
3. Belotserkovsky M.A., Sosnovskiy A.V., Pryadko A.S., Yalovik A.P. Vybory tekhnologicheskikh parametrov protsessy naneseniya stalnykh pokrytiy metodom giperzvukovoy metallizatsii [Selecting the technological parameters of steel coatings formation by hypersonic metallization]. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov* [Mechanics of machines, mechanisms and materials], 2015, no. 3, pp. 52–57.
4. Belotserkovsky M.A., Yalovik A.P. Ispolzovanie giperzvukovoy metallizatsii pri remonte shtokov gidrotsilindrov [Using hypersonic metallization in the repair of hydraulic cylinder rods]. *Sovremennyye metody i tekhnologii sozdaniya i obrabotki materialov. Kniga 2. Tekhnologiya i oborudovanie mekhanicheskoy i fiziko-tekhnicheskoy obrabotki* [Modern methods and technologies for creating and processing materials. Book 2. Technology and equipment for mechanical and physical-technical processing], 2016, pp. 29–33.
5. Motyakhov M.F. *Elektrodugovaya svarka metallov* [Electric arc welding of metals]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1975. 232 p.
6. Belotserkovsky M.A., Taran I.I., Kot P.I., Aleksandrova V.S. Tekhnologiya naneseniya polimernykh pokrytiy s povyshennymi gidrofobnymi svoystvami [Technology of application of polymer coatings with high hydrophobic properties]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya* [Topical issues of mechanical engineering], 2018, issue 7, pp. 357–359.
7. Kukareko V.A., Grigorichik A.N., Belotserkovsky M.A., Sosnovskiy A.V. O prirode formirovaniya metastabilnoy austenitnoy struktury pri gazotermicheskom napylenii vysokokhromistoy stali martensitnogo klassa [Nature of formation of metastable austenitic structure during thermal spraying of high-chromium martensitic steel 95Cr18]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* [Strengthening technologies and coatings], 2017, vol. 13, no. 7(151), pp. 318–322.
8. Kukareko V.A., Belyy A.V., Belotserkovsky M.A., Grigorichik A.N. Srstrukturno-fazovoe sostoyanie i iznosostoykost v usloviyakh granichnogo treniya obrabotannykh ionami azota gazotermicheskikh pokrytiy iz staley razlichnykh klassov [Structural phase state and wear resistance under boundary friction of nitrogen-treated gas-thermal coatings of steels of various grades]. *Trenie i iznos* [Friction and wear], 2015, vol. 36, no. 6, pp. 661–670.