

УДК 621.792

## ПРОЦЕСС ФОРМИРОВАНИЯ ПОКРЫТИЙ ИЗ ПСЕВДОСПЛАВОВ ГИПЕРЗВУКОВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИЕЙ

*д-р техн. наук, доц. М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ*  
(Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск)

*Рассматривается метод гиперзвуковой металлизации, направленный на формирование покрытий одновременным распылением разнородных металлов с образованием псевдосплавов, обладающих высокими триботехническими свойствами. Определены условия, при соблюдении которых обеспечивается высокое качество псевдосплавных покрытий.*

**Ключевые слова:** псевдосплавные газотермические покрытия, гиперзвуковая металлизация.

**Введение.** В настоящее время практически все крупногабаритные детали сальниковых узлов гидросистем, детали подвески грузовых автомобилей, штоки виброгасителей подвижного железнодорожного состава, виброрвалы путевых машин, валки прокатных станов металлургического производства и другие элементы силовых систем и динамически нагруженных узлов трения изготавливаются и восстанавливаются с использованием различных методов инженерии поверхности [1]. При этом к свойствам формируемых поверхностных слоев и наносимых покрытий предъявляются требования, которые невозможно обеспечить, используя традиционные материалы или методы модифицирования. Это относится не только к деталям триботехнических сопряжений, но, например, и к элементам зерно- и кормоуборочных комбайнов, контактирующих с ворохом зеленой массы, потоками зерна и т.п., когда необходимо наносить защитное износостойкое покрытие, которое должно обладать как определенными гидрофобными характеристиками и коррозионной стойкостью, так и высокой стойкостью к гидроабразивному изнашиванию. То есть, с одной стороны, иметь износостойкость стали, а с другой – показатели смачиваемости цинка или полиамида. Необходимое сочетание твердости, низкого коэффициента трения, сопротивления изнашиванию в присутствии абразива, демпфирующих свойств, коррозионной стойкости зачастую ограничено экономическими соображениями.

Одним из новых перспективных методов триботехнического материаловедения является использование так называемой «O'Spray» технологии, когда изделие или покрытие формируется из расплавленных частиц двух или трех материалов, переносимых перемешивающимися высокоскоростными газовыми потоками [2; 3]. После кристаллизации частиц образуются псевдосплавы, обладающие уникальными свойствами. Материалы типа псевдосплавов характеризуются рядом важных свойств – сочетанием высоких значений температуры плавления с механической прочностью, твердостью, демпфирующей способностью, износостойкостью, способностью к самосмазыванию в условиях сухого трения, гидрофобностью. Вместе с тем известные методы «O'Spray» весьма энергоемки, требуют использования дорогостоящего специализированного оборудования и расходных материалов, а также не применяются при восстановлении деталей и не работоспособны в тяжело нагруженных узлах трения, что обусловлено возникновением в поверхностных слоях псевдосплавов повреждений на границах раздела частиц с различными механическими свойствами.

Для получения псевдосплавных покрытий со структурой и свойствами, присущими композиционным материалам, в последние годы все шире используются методы электроискрового легирования, ионно-плазменного магнетронного распыления, газотермического напыления, в частности электродуговой металлизации, при этом последняя технология является наиболее производительным, экономичным и удобным для использования в серийном производстве методом [4–6].

Целью исследований, результаты которых представлены в данной работе, явилось исследование процесса нанесения псевдосплавных покрытий методом гиперзвуковой металлизации (ГМ), одним из самых высокоэффективных на современном этапе технологических приемов газотермического напыления и отличающихся высокими динамическими параметрами распыляющего потока, что и обусловило название процесса. Гиперзвуковая металлизация отличается от традиционной электрометаллизации использованием непрерывного источника энергии для нагрева газа, распыляющего расплавленные в дуге проволоки. Нагретый до температуры около 2000 °С газ, истекая через сопло Лаваля, приобретает скорость 1100...1500 м/с, что позволяет разогнать частицы распыленного материала до скоростей порядка 450 м/с [7].

**Оборудование и методики исследований.** Для нанесения псевдосплавных покрытий использовались проволоки диаметром от 1,6 и выше из сталей мартенситного класса 40X13, аустенитного класса 12X18H10T, бронз БрОФ7-0,2 и БрАЖ9-4, цинка Ц1, алюминия АМг3.

Струйно-абразивная подготовка поверхности образцов осуществлялась электрокорундом грануляцией 1,4...1,7 мм по ГОСТ 3647-80 при давлении воздуха 0,4...0,6 МПа, расходе воздуха от 2,5...5,0 м<sup>3</sup>/мин, угле атаки между струей абразива и поверхностью детали 60...75 град, расстоянии от сопла до обрабатываемой детали 70...100 мм.

Покрyтия наносились на установке для гиперзвуковой металлизации АДМ-10, разработанной в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси [7]. В качестве горючего газа для формирования расплывающегося факела использовался пропан. После напыления поверхность псевдосплава подвергалась механической шлифовке с финишной доводкой на абразивной бумаге Р 320.

Пористость псевдосплавных покрытий, напыленных на пластины (50×50×5 мм) из стали 45, составляла ≈ 2...4 об.%. Исследование фазового состояния напыленного псевдосплава осуществляли на дифрактометре ДРОН-2.0 в монохроматизированном кобальтовом (CoKα) 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 АЛЬТАМИ МЕТ 1МТ. Измерения твердости по Виккерсу – на твердомере DuraScan 20 при нагрузке на индентор  $P = 10$  г и 10 кг.

Триботехнические испытания образцов напыленного сплава проводились на трибометре АТВП. Испытания осуществлялись по схеме возвратно-поступательного движения контактирующих тел при средней скорости взаимного перемещения ≈ 0,1 м/с. При испытаниях использовалось контртело, изготовленное из закаленной стали У8 (800 HV10).

**Полученные результаты и их обсуждение.** В ходе экспериментальных исследований процесса ГМ псевдосплавных покрытий замечено, что при подключении проволоки из более тугоплавкого материала к положительному потенциалу сварочного источника, использующегося в установке АДМ-10, равномерность распыления резко возрастает и достигает своего максимума при некотором увеличении диаметра легкоплавкой проволоки относительно тугоплавкой. Вероятно, это следствие того, 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 [8].

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

Таблица 1. – Используемые в исследованиях материалы и качество покрытий, полученных при гиперзвуковой металлизации

№	Материал тугоплавкой проволоки	Диаметр тугоплавкой проволоки, мм	Материал легкоплавкой проволоки	Диаметр легкоплавкой проволоки, мм	Результаты металлизации, качество покрытия
1	сталь	2,0	алюминий	1,6	Имеются дефектные участки
2	то же	2,0	то же	2,0	Имеются дефектные участки
3	-"	2,0	-"	2,4	<b>Процесс стабилен, качество покрытий хорошее</b>
4	-"	2,0	-"	2,5	Имеются дефектные участки
5	-"	1,6	-"	1,8	Имеются дефектные участки
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	то же	2,2	<b>Процесс стабилен, качество покрытий хорошее</b>
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
13	-"	2,0	цинк	1,8	Процесс не стабилен
14	-"	2,0	то же	2,0	Процесс не стабилен
15	-"	2,0	-"	2,5	<b>Процесс стабилен, качество покрытий хорошее</b>
16	-"	1,6	-"	1,8	Имеются дефектные участки
17	-"	1,6	-"	2,0	<b>Процесс стабилен, качество покрытий хорошее</b>

Окончание таблицы 1

№	Материал тугоплавкой проволоки	Диаметр тугоплавкой проволоки, мм	Материал легкоплавкой проволоки	Диаметр легкоплавкой проволоки, мм	Результаты металлизации, качество покрытия
18	бронза	2,0	алюминий	1,6	Процесс не стабилен
19	то же	2,0	то же	1,8	Имеются дефектные участки
20	"-	2,0	"-	2,0	Имеются дефектные участки
21	"-	2,0	"-	2,2	<b>Процесс стабилен, качество покрытий хорошее</b>
22	"-	2,0	"-	2,5	Имеются дефектные участки
23	"-	1,8	"-	2,0	<b>Процесс стабилен, качество покрытий хорошее</b>
24	"-	1,8	"-	2,5	Имеются дефектные участки
25	"-	2,0	цинк	1,8	Имеются дефектные участки
26	"-	2,0	то же	2,0	Процесс не стабилен
27	"-	2,0	"-	2,2	Процесс не стабилен
28	"-	2,0	"-	2,5	<b>Процесс стабилен, качество покрытий хорошее</b>
29	алюминий	2,0	цинк	2,0	Имеются дефектные участки
30	то же	2,0	то же	2,2	<b>Процесс стабилен, качество покрытий хорошее</b>
31	"-	2,0	"-	2,5	Процесс не стабилен
32	"-	1,8	"-	2,5	Процесс не стабилен
33	"-	1,8	"-	2,0	<b>Процесс стабилен, качество покрытий хорошее</b>
34	"-	1,8	"-	1,8	Имеются дефектные участки
35	"-	1,6	"-	1,8	<b>Процесс стабилен, качество покрытий хорошее</b>
36	"-	1,6	"-	2,0	Имеются дефектные участки

В ходе анализа полученных результатов 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 *второй 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 этих результатов получена эмпирическая зависимость между диаметром распыляемых проволок и их температурой плавления, которая описывается следующим выражением:

$$d_{\text{л}} = d_{\text{т}} (T_{\text{т}} / T_{\text{л}})^{0,25}, \quad (1)$$

где  $d_{\text{л}}$ ,  $T_{\text{л}}$  – диаметр (мм) и температура плавления ( $^{\circ}\text{C}$ ) более легкоплавкой проволоки, мм;  $d_{\text{т}}$ ,  $T_{\text{т}}$  – диаметр (мм) и температура плавления ( $^{\circ}\text{C}$ ) более тугоплавкой проволоки.

Следующий этап исследований был посвящен изучению псевдосплавных покрытий «сталь-бронза». На рисунке 1 представлен фотоснимок образца композиционного покрытия «сталь-бронза» и его микроструктура, на которой различимы перемежающиеся слои стальных и бронзовых частиц. Твердость покрытия составила 250...270 HV 10.

Результаты проведенного рентгеноструктурного анализа покрытия из псевдосплава «сталь-бронза» свидетельствуют о том (рисунок 2), что покрытие содержит следующие фазы:  $\alpha\text{-Fe}$ ,  $\gamma\text{-Fe}$ , Cu,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .

Также были проведены сравнительные триботехнические испытания образца исходной бронзы и газотермического покрытия из псевдосплава «сталь-бронза».

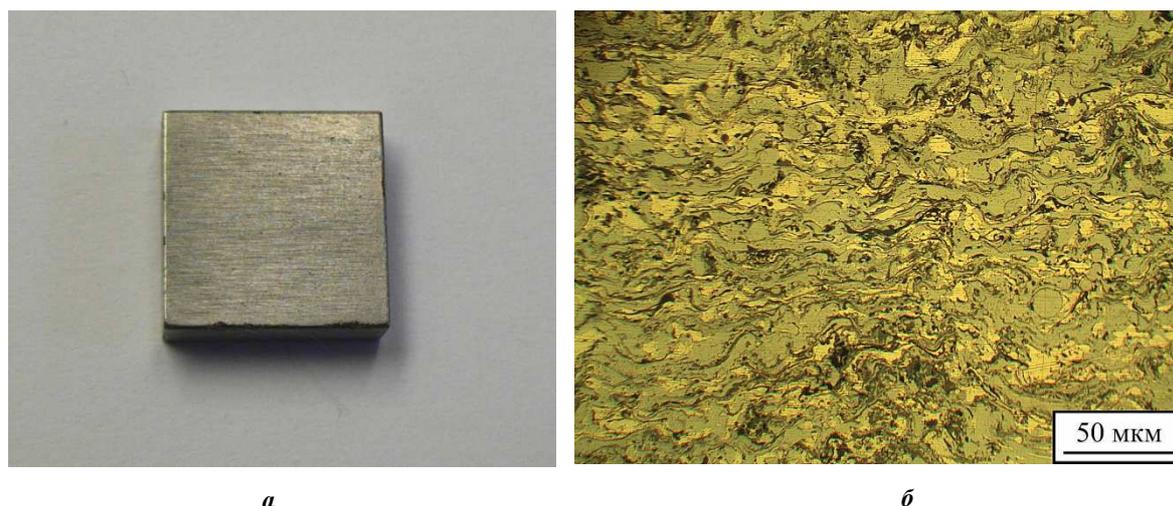


Рисунок 1. – Фотоснимок (а) и микроструктура (б) образца псевдосплава «сталь-бронза», полученного методом гиперзвуковой металлизации

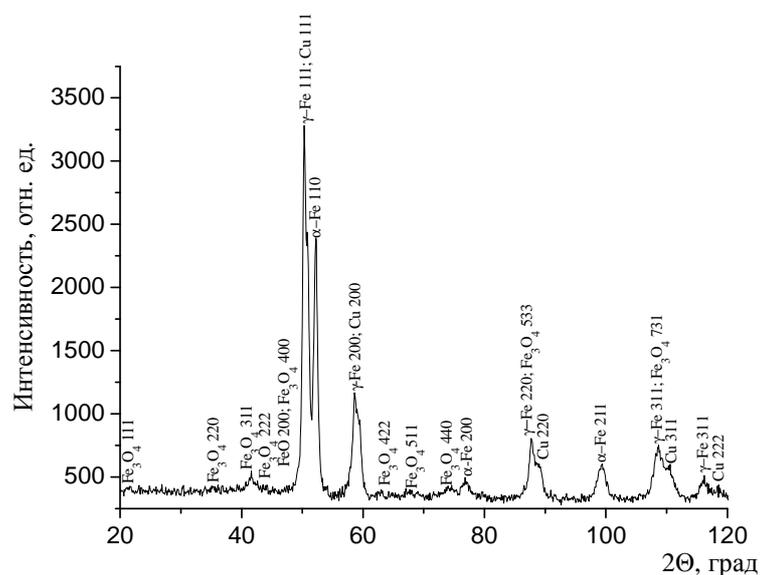


Рисунок 2. – Фрагмент рентгеновской дифрактограммы от поверхностных слоев псевдосплава «сталь-бронза»

На рисунке 3 показаны зависимости линейного износа от пути трения при испытаниях бронзы и композиционного покрытия в условиях трения со смазочным материалом Литол-24. Давление в ходе проведения испытаний составляло 10 МПа.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что при испытаниях стандартной бронзы регистрируется быстрый выход на стадию установившегося изнашивания и относительно высокий износ образца. При этом интенсивность линейного изнашивания бронзового образца составил  $I_h = 0,90 \cdot 10^{-8}$ .

В случае триботехнических испытаний газотермического композиционного покрытия «сталь-бронза» стадия приработки завершается после 1700...2000 м пути трения. При этом величина линейного износа псевдосплава «сталь-бронза» существенно ниже величины износа бронзового образца. Интенсивность линейного изнашивания образца на стадии установившегося трения составляет  $I_h = 0,48 \cdot 10^{-9}$ . Таким образом, износостойкость композиционного газотермического покрытия в  $\approx 20$  раз превышает износостойкость исходной бронзы.

На следующем этапе исследовались покрытия, полученные совместным распылением проволок из сталей различных классов. Химический состав распыляемых материалов и нанесенного покрытия приведен в таблице 2. Микроструктура покрытия показана на рисунке 4.

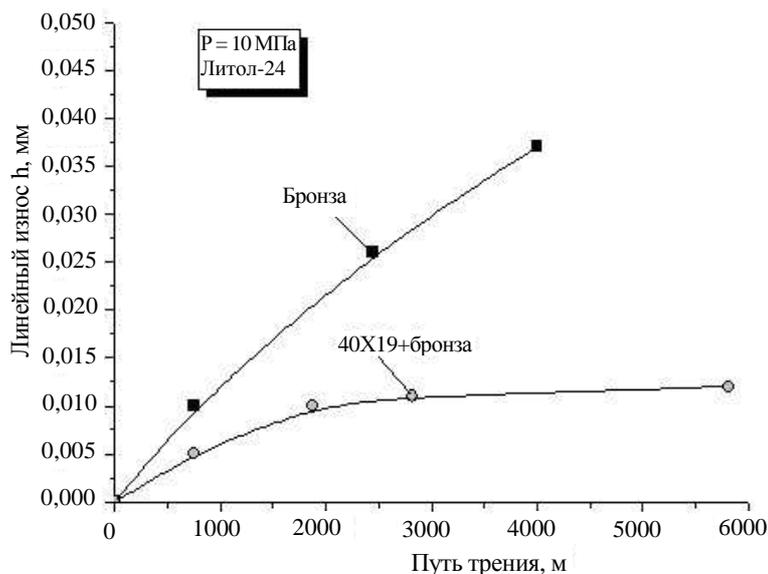


Рисунок 3. – Зависимость линейного износа от пути трения при испытаниях бронзы и композиционного покрытия в условиях трения со смазочным материалом Литол-24

Таблица 2. – Химический состав распыляемых проволок и нанесенного покрытия

Материал	Концентрация элементов, масс.%						
	C	Cr	Ni	Ti	Mn	Si	Fe
40X13	0,42	13,2	0,60	0,35	0,40	0,42	основа
12X18Н10Т	0,12	18,3	10,1	0,80	2,00	0,80	основа
Покрытие	0,2...0,3	15,7	3,97	–	0,75	0,44	основа

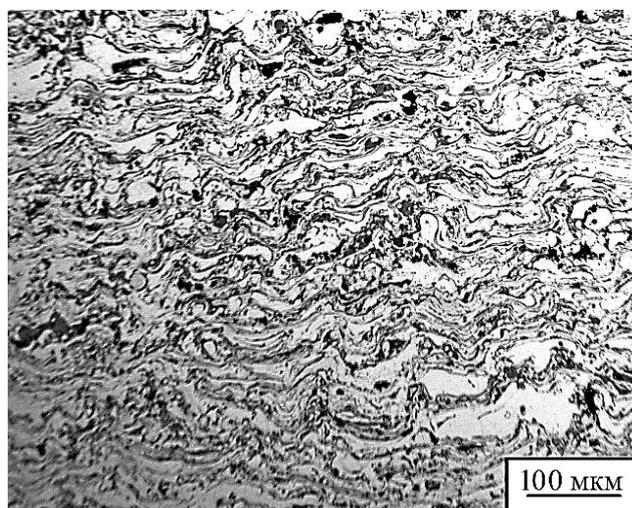


Рисунок 4. – Микроструктура псевдосплава из высокохромистых сталей 40X13 и 12X18Н10Т, полученного методом ГМ

Фрагмент рентгеновской дифрактограммы от поверхностных слоев псевдосплава из высокохромистых сталей 40X13 и 12X18Н10Т представлен на рисунке 5, который свидетельствует о том, 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, 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 1). Твердость напыленного псевдосплава составляет  $\approx 370...380$  HV 10, что близко к твердости газотермического покрытия из аустенитной стали 06X19H9T.

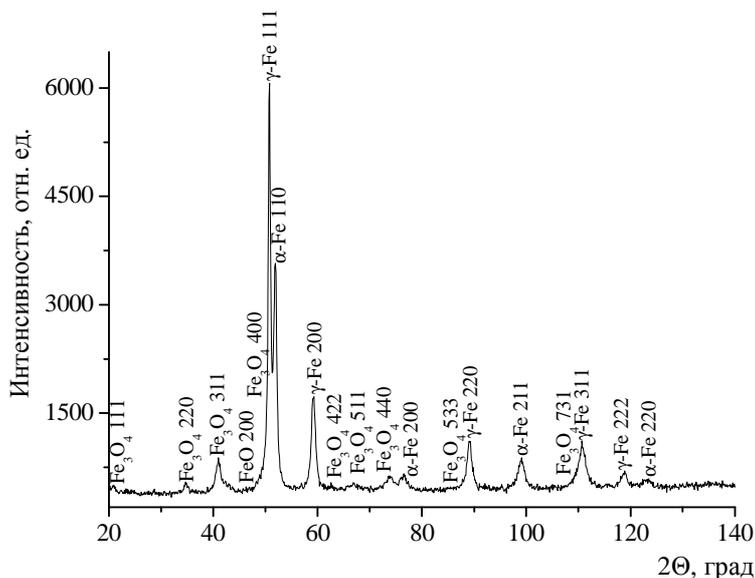


Рисунок 5. – Фрагмент рентгеновской дифрактограммы ( $\text{CoK}_\alpha$ ) от поверхностных слоев псевдосплава из высокохромистых сталей 40X13 и 12X18H10T

Анализ результатов триботехнических испытаний псевдосплава из высокохромистых сталей в условиях трения без смазочного материала, а также покрытий из сталей 40X13 и 06X19H9T без смазочного материала при 1,5 МПа показал (рисунок 6), что износостойкость псевдосплава из высокохромистых сталей 40X13 и 12X18H10T соответственно в 3,8 и 12,0 раз выше, чем у газотермических покрытий из сталей 40X13 и 06X19H9T. При этом интенсивность массового изнашивания псевдосплава, полученного гиперзвуковой металлизацией, составляет  $\approx 1,2 \cdot 10^{-3}$  мг/м.

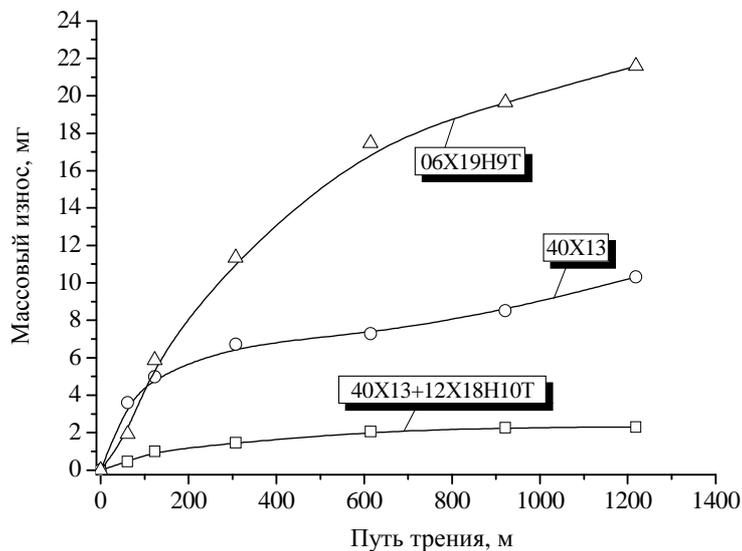


Рисунок 6. – Зависимости массового износа от пути трения для газотермических покрытий из сталей различных классов, а также псевдосплава из высокохромистых сталей

В процессе фрикционного взаимодействия снижается содержание аустенитной фазы в поверхностных слоях псевдосплава до  $\approx 45$  об.%, а его микротвердость возрастает до  $\approx 850$  HV 0,01. Высокая износостойкость псевдосплава из двух сталей – 40X13 и 12X18H10T – достигается за счет деформационно-активированного  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения, протекающего в процессе трения в поверхностных слоях покрытия, а также за счет деформационного упрочнения  $\gamma$ -фазы. 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 06X19H9T, содержащего близкое количество  $\gamma$ -фазы ( $\approx 68$  об.%), регистрируется повышенный износ (см. рисунок 6), обусловленный низкими прочностными свойствами напыленных частиц.

Таким образом, из полученных результатов следует, что псевдосплавное покрытие на основе высокохромистых сталей 40X13 и 12X18H10T характеризуется высокой износостойкостью в условиях трения без смазочного материала.

**Заключение.** Исследование метода гиперзвуковой металлизации при одновременном распылении проволок различных металлов с целью получения псевдосплавных покрытий показало:

- для обеспечения высокой стабильности процесса и качества формируемых покрытий необходимо к более тугоплавкой проволоке подводить положительный потенциал от сварочного источника питания;
- диаметр более легкоплавкой проволоки следует выбирать в зависимости от температур плавления проволок и диаметра более тугоплавкой проволоки.

В процессе выполнения работы исследована структура, фазовый состав, твердость и износостойкость композиционного покрытия «сталь 40X13-бронза», полученного методом гиперзвуковой металлизации. Показано, что износостойкость сформированного псевдосплава в  $\approx 20$  раз превышает износостойкость исходной бронзы.

Исследовано структурно-фазовое состояние и трибомеханические свойства псевдосплава из высокохромистых сталей 12X18H10T и 40X13. Показано, что псевдосплав характеризуется повышенным содержанием  $\gamma$ -фазы ( $\approx 60$  об.%) и относительно пониженным значением твердости, составляющим 370...380 HV 10. Установлено, что износостойкость псевдосплава из высокохромистых сталей 12X18H10T и 40X13 в условиях сухого трения в 3,8 и 12,0 раз выше износостойкости газотермических покрытий из мартенситной 40X13 и аустенитной стали 06X19H9T соответственно.

На основании полученных данных сделан *вывод*: метод гиперзвуковой металлизации позволяет формировать покрытия с высокими физико-механическими свойствами из экономичных псевдосплавов, что существенно расширяет область использования данного метода.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Инженерия поверхности деталей / под ред. А.Г. Суслова. – М. : Машиностроение, 2008. – 320 с.
2. Handbook of Thermal Spray Technology ; ed. Joseph R. Davis. – ASM. N.Y., 2004. – 413 p.
3. Spray forming [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.en.wikipedia.org/wiki/Spray\\_forming](http://www.en.wikipedia.org/wiki/Spray_forming). – Дата доступа: 10.04.2014.
4. Вигилянская, Н.В. Газотермическое напыление псевдосплавных покрытий / Н.В. Вигилянская, Ю.С. Борисов, И.А. Демьянов // Автоматическая сварка. – 2012. – № 1. – С. 48–55.
5. Способ получения газотермических покрытий : пат. RU 2063470 / А.Е. Титлянов, А.Г. Радюк, С.И. Педос. – Оpubл. 10.07.1996.
6. Оптимизация методов, материалов и технологий поверхностного упрочнения с использованием способов газотермического напыления / М.А. Белоцерковский [и др.] // Вестн. РГУПС. – Ростов н/Д, 2017. – № 4. – С. 8–15.
7. Оценка возможности использования гиперзвуковой металлизации при восстановлении элементов гидросистем / М.А. Белоцерковский [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета, Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2015. – № 11. – С. 36–42.
8. Мотяхов, М.Ф. Электродуговая сварка металлов / М.Ф. Мотяхов. – М. : Высш. шк., 1975. – 232 с.

Поступила 29.06.2018

#### THE STUDY OF THE FORMATION OF COATINGS OF PSEUDOPLANES HYPERSONIC METALLIZATION

*M. BELOTSERKOVSKY*

*The method of hypersonic metallization aimed at the formation of coatings by simultaneous spraying of dissimilar metals with the formation of pseudo-alloys with high tribotechnical properties is considered. The conditions under which the high quality of pseudo-alloy coatings is ensured are determined.*

**Keywords:** *pseudoplane thermal spray coating, hypersonic metallization.*