

УДК 621.762

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОЦЕССА ГИПЕРЗВУКОВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ЭЛЕМЕНТОВ ГИДРОСИСТЕМ

д-р техн. наук, доц. М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ; канд. техн. наук А.В. СОСНОВСКИЙ
(Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск);
А.П. ЯЛОВИК (ОАО «Нефтезаводмонтаж», Новополоцк);
канд. техн. наук, доц. А.В. ДУДАН
(Полоцкий государственный университет)

Представлены результаты исследований процесса гиперзвуковой металлизации хромосодержащих покрытий. Показаны возможности использования порошковых композиционных проволок, а также проволок из литых сталей. Анализ полученных результатов показал, что для формирования покрытий из композиционных порошков методом гиперзвуковой металлизации рационально использовать проволоки с порошковым наполнителем, имеющим размер частиц менее 80 мкм. Проведенные исследования позволяют рекомендовать в качестве альтернативы гальваническому хромированию технологию гиперзвуковой металлизации с использованием литых проволок из сталей мартенситного класса при изготовлении и для восстановления или упрочнения элементов гидросистем.

Введение. Эффективность работы комбинированных дорожных и строительных погрузочно-разгрузочных машин, технологического оборудования предприятий перерабатывающей, деревообрабатывающей, химической отраслей промышленности, металлообрабатывающих автоматических линий во многом зависит от качества, надежности и технических характеристик элементов гидравлических систем.

Гидравлические приводы включают: направляющую гидроаппаратуру, регулирующую гидроаппаратуру, вспомогательные элементы, исполнительные механизмы (гидроцилиндры, гидродвигатели, электрогидравлические шаговые приводы и др.). В процессе их эксплуатации изменяются показатели, характеризующие работу основных агрегатов: насосов, распределительных устройств, силовых цилиндров. Такие изменения показателей являются результатом изнашивания узлов и сопряжений, нарушения герметичности уплотнений. Так, например, понижение скорости подъема груза может быть следствием износа деталей силового цилиндра.

При изготовлении деталей гидравлических систем используют гальваническое хромирование узлов трения для обеспечения их высокой износостойкости и коррозионной стойкости. Штоки с поврежденной хромированной наружной поверхностью, контактирующей с уплотнительными элементами, обычно заменяют новыми, поскольку величина повреждений и износа превышает толщину гальванического хромового покрытия, при этом шток с поврежденным покрытием уходит на переплавку. Также недостатком гальванического хромирования является наличие высокотоксичных отходов. Таким образом, замена гальванического хромирования другим высокопроизводительным методом, позволяющим получать коррозионно-стойкие покрытия большей толщины (0,05...2 мм) с минимальным загрязнением окружающей среды, достаточно актуальная проблема.

В настоящее время широкое распространение получили методы плазменного и высокоскоростного напыления, которые позволяют наносить высокоплотные и коррозионно-стойкие покрытия на различные детали машин. Однако данные процессы характеризуются и недостатками, таким как низкая производительность, значительные затраты на реализацию, а также высокая стоимость присадочного материала и оборудования.

Технология гиперзвуковой металлизации. Один из наиболее перспективных способов получения покрытий, которые можно использовать взамен гальванического хромирования, – гиперзвуковая металлизация (ГМ) (рис. 1).



Рис. 1. Процесс нанесения покрытия гиперзвуковой металлизацией

Нанесение покрытий данным способом осуществляется путём распыления расплава, полученного в результате плавления двух проволок электрической дугой, возникающей при пропускании через проволоку электрического тока. Распыление расплава реализуется с помощью высокоскоростной струи продуктов сгорания воздушно-пропановой смеси. Отличительной особенностью ГМ является наличие малогабаритной высокоэффективной камеры сгорания воздушно-пропановой смеси, сверхзвуковая струя которой имеет на выходе скорость 1500 м/с при температуре 1850 °С. Это позволяет частицам расплавленного металла разогнаться в потоке до 500 м/с и формировать покрытие, имеющее плотность и прочность сцепления в 2...3 раза выше, чем при традиционной электродуговой металлизации. Такие отличительные особенности процесса ГМ позволяют получать высокоплотные покрытия с пористостью 1...5 и прочностью сцепления 50...60 МПа [1].

При выполнении экспериментальных исследований нами использовалась установка ГМ модели АДМ-10, разработанная в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси.

Выбор напыляемых материалов. Анализируя условия эксплуатации штоков с гальваническими хромовыми покрытиями было предложено для гиперзвуковой металлизации использовать материалы на основе железа с содержанием хрома более 14,0 масс. % и углерода не менее 0,3 масс. %, что, по нашему мнению, должно было обеспечивать необходимый уровень микротвердости, износостойкости и стойкости к коррозионному разрушению. В настоящее время данным параметрам соответствуют порошковые проволоки, предназначенные для дугового напыления покрытий на детали узлов трения, работающих в условиях интенсивного изнашивания и в присутствии агрессивных сред. К настоящему времени практически всеми крупными производителями напыляемых материалов освоен выпуск композиционных порошковых проволок, представляющих собой, как правило, стальную или никелевую оболочку, заполненную порошковой шихтой (рис. 2).

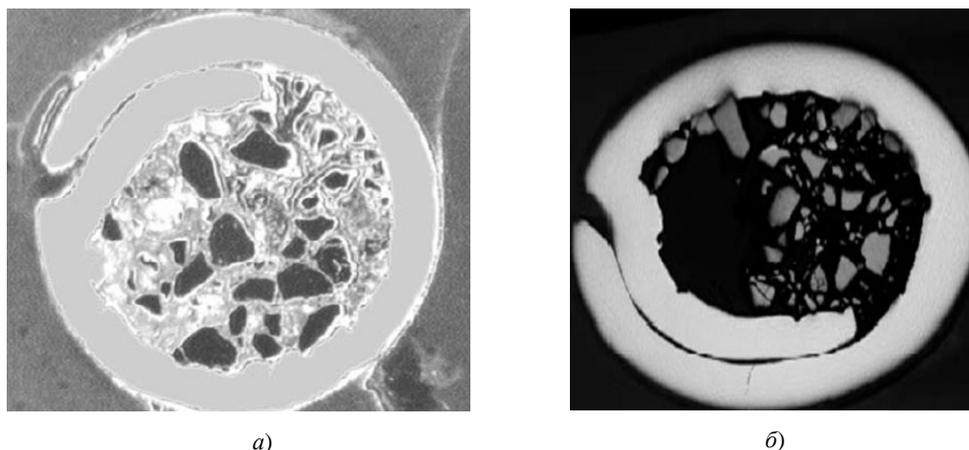


Рис. 2. Поперечное сечение композиционных проволок фирм «Durum» (а) и «Sulzer Metco» (б)

В экспериментах использовали порошковую проволоку PST-5 (состав: Ni 4,9/ Cr 14,8/ W 3,6/ Nb 2,2/ Ti 0,45/ Al 0,56/ C 0,3/ F), выпускаемую Днепропетровским ЗАО «Спецсплав»; порошковые проволоки фирмы «Durum» марки AS-897 (состав: Si 1,25/ Ni 4,5/ Cr 14/ Mn 5,5/ B 1,85/ W 26/ Ti₂C₃ 6/ Fe), AS-815 (состав: C 4,8/ Cr 28/ Si 1,4/ B /Fe) и AS-760 (состав: C 0,3/ Cr 19/ Si 3,8/ B 1,2/ Ni); порошковые проволоки фирмы «Castolin Eutectic» марки EuTronic Arc 532 (состав: C 3,5/ Cr 30/ Mn 0,8/ Si 1,2/ Fe) и EuTronic Arc 502 (состав: C 4/ Cr 18/ Mn 0,8/ Si 1,5/ B 1,0/ Fe); порошковую проволоку фирмы «Sulzer Metco» марки Sulzer Metco 8297 (состав: Si/ Cr 14/ Ni 5/ B 1,5/ WC 25 + TiC 5/ Fe).

В результате измерения твердости, микротвердости покрытий установлено, что покрытия, сформированные распылением проволоки производства ЗАО «Спецсплав», не обеспечивают твердости, гарантированной изготовителями. Как правило, твердость покрытий не превышала 32 HRC.

Изучение шлифов поперечных сечений проволок показало, что размеры частиц твердых включений в шихте составляют более 250 мкм, а толщина оболочки – около 350 мкм. Вероятней всего, при высокой скорости эвакуации из зоны дуги столь крупные частицы не успевают прогреться и не участвуют в процессе формирования покрытия, образуя практически только из материала оболочки. Отсюда следует, что композиционная проволока марки PST-5 предназначена в основном для процессов наплавки, а не напыления.

Нанесение покрытий проволоками, изготовленными фирмами «Durum», «Castolin Eutectic» и «Sulzer Metco», показало, что указанные выше материалы позволяют формировать покрытия с твердо-

стью, близкой к заявленной изготовителем (52...58 HRC). Размер частиц наполнителя (см. рис. 1) составляет 30...120 мкм при толщине оболочки 150 мкм.

Учитывая результаты ранее проведенных исследований [2], нами предложено также использовать наряду с порошковыми проволоками монолитные стальные проволоки марок 40X13 и 95X18. Выбор данных марок стали обусловлен тем, что в них содержится достаточно большое количество хрома, что обуславливает их высокую коррозионную стойкость.

Результаты исследований и их обсуждение. На основании анализа результатов исследования зависимости коэффициента использования распрыскиваемого материала от основных технологических параметров процесса (сила тока, напряжение, давление пропана и воздуха) для нанесения покрытий из композиционных порошковых проволок выбраны следующие режимы гиперзвуковой металлизации: ток – 120...150 А; напряжение – 32...33 В; давление пропана – 0,43 МПа; давление воздуха – 0,45 МПа; дистанция – 150 мм. В качестве материала подслоя использовался сплав X20H80 (20 % Cr, 80 % Ni).

Первые эксперименты показали, что композиционные порошковые проволоки весьма чувствительны к толщине наносимого покрытия. Так, на указанных выше режимах практически не удавалось получить из материала DURMAT AS-897 покрытия толщиной более 1,1 мм. После напыления слоя толщиной около 0,9 мм на нем появлялись микротрещины, которые после напыления слоем в 1 мм увеличивались в размерах, а при достижении толщины 1,1 мм покрытие лопалось (рис. 3).

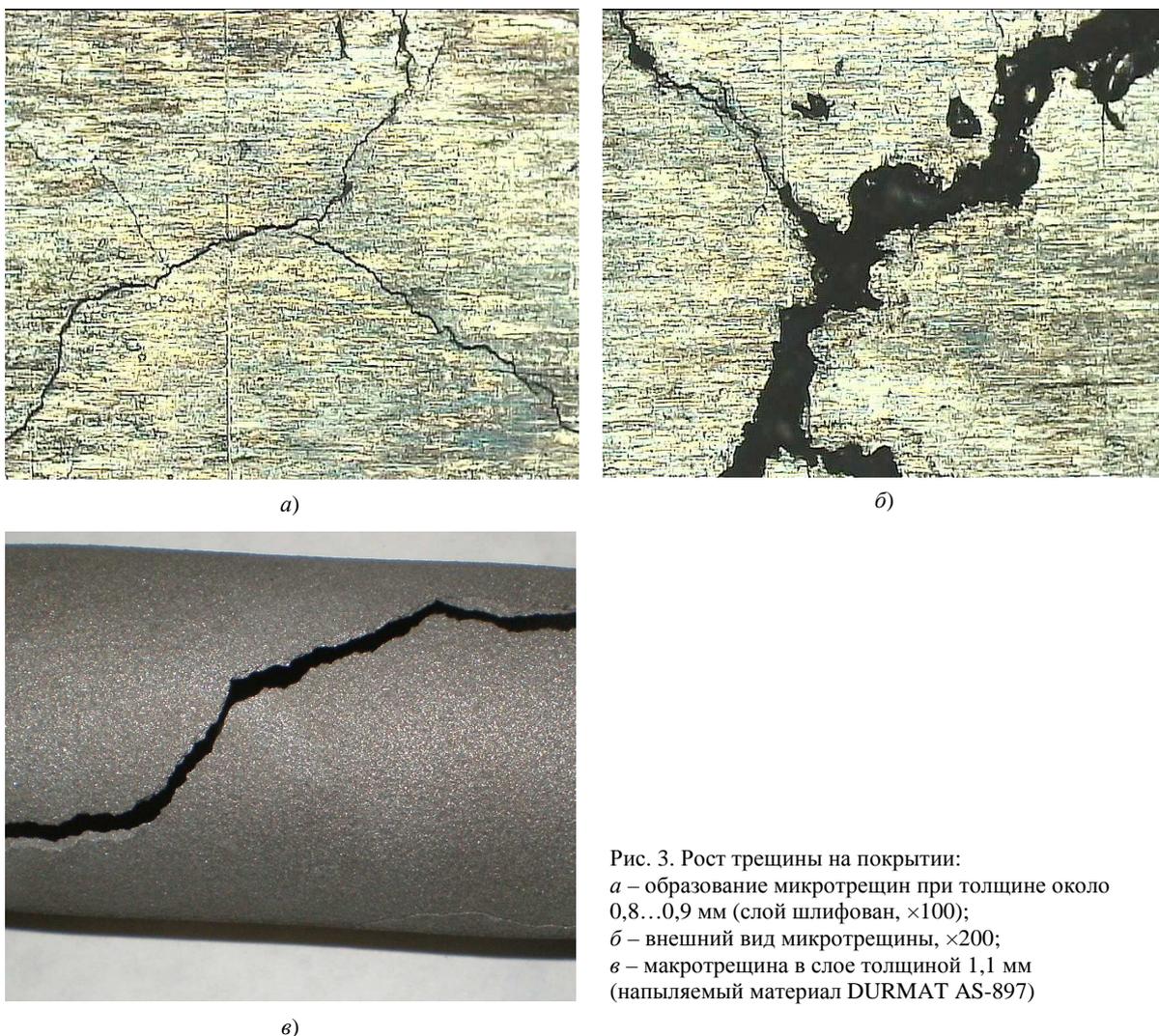
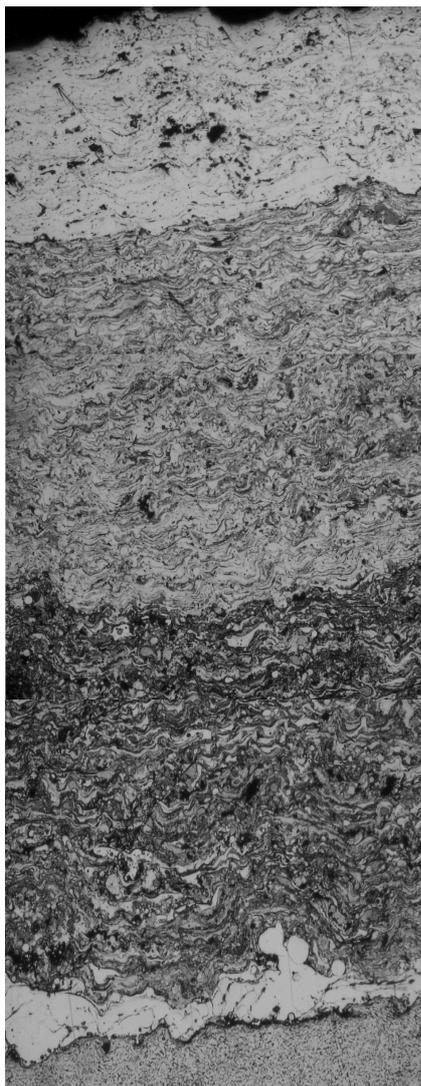


Рис. 3. Рост трещины на покрытии:
a – образование микротрещин при толщине около 0,8...0,9 мм (слой шлифован, $\times 100$);
b – внешний вид микротрещины, $\times 200$;
в – макротрещина в слое толщиной 1,1 мм (напыляемый материал DURMAT AS-897)

Материалы DURMAT AS-815 и DURMAT AS-760 позволяют получать покрытия большей толщины (до 2 мм), однако для этого необходимо уменьшать толщину формируемого за один проход слоя, увеличивать количество проходов и непрерывно контролировать температуру образца.

Для получения покрытий из материала DURMAT AS-897 толщиной 1,5 мм и более проведены эксперименты, в которых последовательно наносились слои из различных литых и порошковых проволок, а верхний слой формировался из AS-897 (рис. 4).



Слой DURMAT AS-897

Слой из стали 40X13

Слой из порошковой проволоки
30X20НМ

Подслой из X20H80

Стальная основа

Рис. 4. Микроструктура многослойного покрытия

Анализ микроструктуры показал:

- в верхнем слое из AS-897 трещины отсутствуют;
- плотность напыленных слоев из стали 40X13 и из порошковой проволоки 30X20НМ близка к плотности компактного материала;

- в слое AS-897 присутствуют включения и поры, которые трудно различить друг от друга. Как правило, в газотермических покрытиях редко встречаются поры сферической формы, поскольку они образуются на границах деформированных при ударе частиц и имеют вытянутую форму.

Результаты исследования микротвердости напыленных слоев из материала AS-897 проиллюстрированы рисунком 5. Первый слой толщиной 100...120 мкм из AS-897, напыленный на подслой из X20H80, имеет наибольшую микротвердость, которая составляет 700...800 кг/мм² или 7000...8000 МПа (в переводе в единицы HRC (Роквелл, шкала С) это составляет 59...62 HRC). Последующие слои имеют твердость значительно ниже, что можно объяснить только влиянием температуры образца, накапливающейся с каждым последующим слоем. Таким образом, можно сделать вывод о необходимости дискретного выполнения операции напыления и интенсивного охлаждения детали после напыления каждого слоя толщиной не более 120 мкм.

Результаты первых экспериментов по механической обработке покрытий показали, что для шлифования покрытий из материалов «Durum» необходимо выбирать конкретные специфические режимы и типы шлифовальных кругов. После использования обычных кругов для шлифовки литых сталей на поверхности покрытия появились мелкие впадины, похожие на поры (рис. 6, б). Особенно это характерно для проволок марок DURMAT AS-897 и Sulzer Metco 8297. После более тщательного анализа этих дефектов было установлено, что эти впадины не являются порами, а представляют собой пустоты, оставленные выкрашивающимися при шлифовании частицами карбидов, входящими в состав распыляемого

материала. В связи с отсутствием необходимых шлифовальных кругов дальнейшая обработка производилась вручную с помощью шлифовальных шкур. Ручная обработка позволила получить поверхность без подобных дефектов.

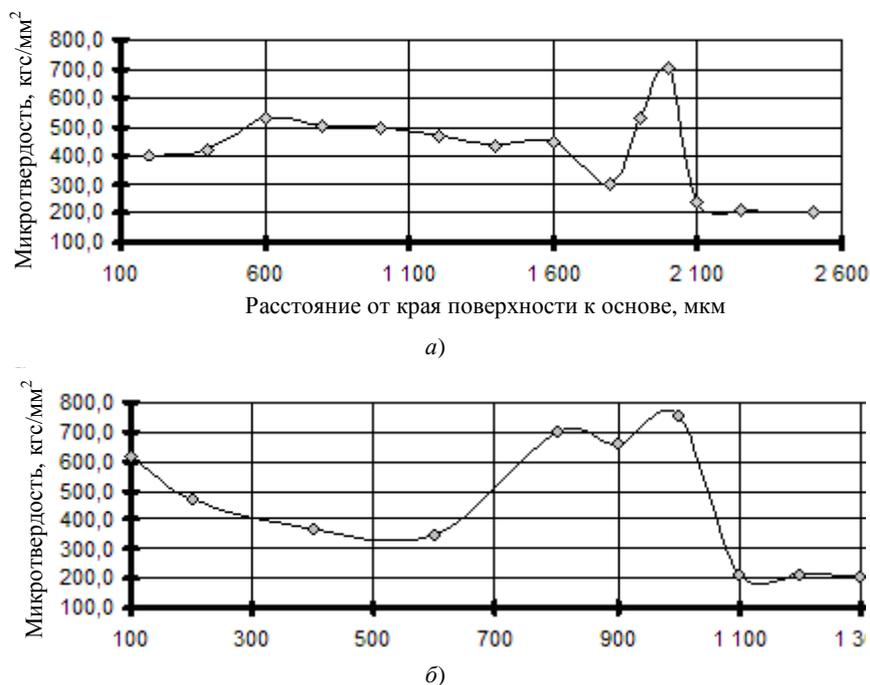


Рис. 5. Распределение микротвердости по толщине покрытий из материала AS-897:
 а – покрытие, включающее подслоу X20H80 (≈ 200 мкм),
 слой DURMAT AS-897 (≈ 600 мкм), слой смеси AS-897 + 40X13 (≈ 900 мкм);
 б) покрытие, включающее подслоу подслоу X20H80 (≈ 200 мкм) и далее слой AS-897



Рис. 6. Внешний вид напыленного покрытия (а) и поверхность после шлифования ($\times 200$)

Исследования коррозионной стойкости проводились путём помещения образцов с покрытием в атмосферу раствора хлористого натрия при повышенной температуре. После чего определялось время протекания коррозионных процессов в материале покрытия, приводящих к образованию дефектов на подложке. Результаты исследований показали, что наилучшей коррозионной стойкостью обладает покрытие из проволоки марки Castolin Eutectic 532, DURMAT AS-897 и Sulzer Metco 8297, так как после 80 часов испытаний признаков коррозии не обнаружено. Несмотря на высокие показатели коррозионной стойкости покрытий из композиционных проволок, их использование не всегда рентабельно из-за высокой стоимости (более 40 €/кг). Помимо этого, наличие твёрдых включений в покрытии приводит к интенсивному изнашиванию контртела в узле трения, что вызывает необходимость частой замены сальников гидроцилиндра, в котором используются штоки с напыленным покрытием. Эти причины обусловили необходимость проведения исследований с высокохромистыми литыми стальными проволоками.

Покрyтия из проволочных сталей 40X13 и 95X18 наносились методом гиперзвуковой металлизации при давлении воздуха 0,35 МПа, давление пропана 0,37 МПа, напряжение дуги 32 В, дистанция напыления 100...120 мм. Использовались проволоки диаметром 1,6 мм. Триботехнические испытания образцов покрyтия проводились на трибометре АТВП по схеме возвратно-поступательного движения контактирующих тел (сухое трение) при средней скорости взаимного перемещения 0,1 м/с. Рентгеновские дифрактограммы от поверхностных слоев покрyтий (дифрактометр «ДРОН-3», монохроматизированное $\text{CoK}\alpha$ -излучение) показали, что фазовый состав газотермического покрyтия из стали 40X13 после механической шлифовки включает: α -Fe (55 об. %); аустенит γ -Fe (11 об. %); оксиды Fe_3O_4 и FeO (34 об. %). Гиперзвуковое газотермическое покрyтие из стали 95X18 имеет следующий фазовый состав: α -Fe (7 об. %); γ -Fe (68 об. %); оксиды Fe_3O_4 и FeO (25 об. %). Характеристики напыленных покрyтий проиллюстрированы данными таблицы.

Характеристики напыленных покрyтий

Материал напыляемого покрyтия	Фазовый состав	Твердость HV 10, кгс/мм ²	Интенсивность массового изнашивания $I_q \cdot 10^{-3}$, мг/м
40X13	α -Fe, γ -Fe, Fe_3O_4 , FeO	600	4,5
95X18	γ -Fe, α -Fe, Fe_3O_4 , FeO	350	1,1

Отмечено, что после механической шлифовки в покрyтии из стали 95X18 по сравнению с покрyтием из стали 40X13 содержится большее количество γ -фазы, что связано с термической стабилизацией аустенита за счет повышенного содержания углерода в напыляемой стали 95X18, а также низкой скоростью охлаждения газотермического покрyтия в процессе напыления. При этом необходимо иметь в виду, что напыление частиц многослойного покрyтия происходит на разогретые частицы предыдущих слоев, имеющих температуру 100...200 °С. Такие условия формирования покрyтия обеспечивают замедленное его охлаждение в интервале температур повышенной устойчивости аустенита, что способствует стабилизации остаточного аустенита в напыленном слое. Из-за более низкой концентрации углерода в стали 40X13 по сравнению со сталью 95X18 мартенситное превращение в покрyтии происходит более полно. В связи с этим в покрyтии из стали 40X13 регистрируется относительно более низкое содержание остаточного аустенита по сравнению с покрyтием из стали 95X18. Вследствие этого покрyтие из стали 40X13 имеет значение твердости поверхностного слоя 600 HV 10, а твердость гиперзвукового газотермического покрyтия из стали 95X18 составляет 350 HV 10 (см. таблицу).

Результаты триботехнических испытаний представлены на рисунке 7 и в таблице 1. Для сравнения представлены результаты триботехнических испытаний покрyтия толщиной 25 мкм, полученного методом гальванического хромирования.

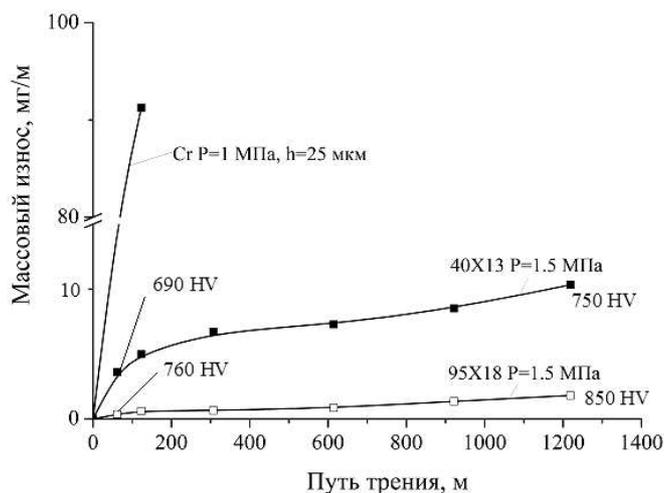


Рис. 7. Зависимость массового износа и микротвердости от пути трения для покрyтий из сталей 40X13, 95X18 и гальванического хромированного покрyтия

Интенсивность массового изнашивания газотермического покрyтия из стали 40X13 составляет $I_q = 4,5 \cdot 10^{-3}$ мг/м. Покрyтие из стали 95X18 характеризуется более высокой износостойкостью по сравнению с покрyтием из стали 40X13. Интенсивность массового изнашивания составляет $I_q = 1,1 \cdot 10^{-3}$ мг/м.

Такая высокая износостойкость покрyтия из стали 95X18 достигается за счет деформационно-активированного $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения в поверхностном слое при трении. При этом на поверхности покрy-

тия образуется тонкий слой с пониженным содержанием аустенита, характеризующийся высокой микротвердостью и износостойкостью. Увеличение микротвердости до 760 HV_{0,02} наблюдается уже в начальной фазе трения, а после пути трения ≈ 1200 м микротвердость покрытия достигает 850 HV_{0,02}.

Такое же $\gamma \rightarrow \alpha$ превращение и, соответственно, увеличение микротвердости в процессе трения происходит в покрытии из стали 40X13, но с меньшей интенсивностью по сравнению с покрытием из стали 95X18, что связано с более низким содержанием углерода в стали 40X13.

Наименьшую износостойкость показало покрытие из гальванического хрома. При этом интенсивность изнашивания составила 17,4 мг/м. Это можно объяснить более рыхлой структурой покрытия, которая имеет низкое сопротивление адгезионному взаимодействию при трении без смазочного материала.

Заключение. В результате анализа полученных результатов установлено, что для формирования покрытий из композиционных порошковых проволок методом гиперзвуковой металлизации необходимо использовать проволоки с порошковым наполнителем, имеющим размер частиц менее 80 мкм, при этом за один проход наносить слои не более 100...120 мкм и охлаждать слои после каждого прохода до комнатной температуры. При необходимости нанесения покрытий из многокомпонентных порошковых проволок толщиной более 0,8 мм следует наносить многослойное покрытие, у которого нижележащие слои наносятся литыми стальными проволоками, а верхний слой из композиционного материала должен иметь толщину не более 0,5 мм.

Показано, что в механически шлифованном покрытии из стали 95X18 регистрируется повышенное количество γ -фазы (68 об. %) по сравнению с покрытием из стали 40X13 ($V_\gamma \approx 11$ об. %). Такое аномально высокое количество аустенита в гиперзвуковом газотермическом покрытии из стали 95X18 связано с термической стабилизацией γ -фазы в процессе охлаждения после напыления. Высокая износостойкость покрытия из стали 95X18 достигается в результате $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения в поверхностном слое в процессе трения, приводящего к увеличению микротвёрдости до 850 HV_{0,02}.

Проведенные исследования позволяют рекомендовать технологию гиперзвуковой металлизации с использованием литых проволок из сталей мартенситного класса при изготовлении или для восстановления-упрочнения элементов гидросистем в качестве альтернативы гальваническому хромированию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Черепко, А.Е. Технологии гиперзвуковой металлизации / А.Е. Черепко, М.А. Белоцерковский, А.С. Прядко // Механика-2011: сб. науч. докл. V Белорус. конгр. по теорет. и прикладной механике, 26–28 окт. 2011 г.: в 2 т.; Объед. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: М.С. Высоцкий [и др.]. – Минск, 2011. – Т. 2. – С. 138–143.
2. Опыт применения гиперзвуковой металлизации для изготовления деталей карьерных самосвалов / М.А. Белоцерковский [и др.] // Композиционные материалы и защитные покрытия: сб. материалов междунар. науч.-техн. семинара, Минск, 27 нояб. 2012 г.; Объед. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: А.А. Дюжев [и др.]; под общ. ред. П.А. Витязя. – Минск: ОИМ НАН Беларуси, 2012. – С. 211–214.

Поступила 16.06.2015

ESTIMATION OF USE THE HYPERSONIC METALLIZATION TO RESTORATION OF HYDRAULIC SYSTEMS ELEMENTS

M. BELOTSERKOVSKY, A. SOSNOVSKY, A. YALOVIK, A. DUDAN

The article describes the results of studies of chromium plating by hypersonic metallization. The possibilities of using powder composite wires and wires of cast steels was shown. It is proposed to replace the process of galvanic chrome plating on the technology of hypersonic metallization.