

УДК 621.793

Ю. С. БОРИСОВ, Н. В. ВИГИЛЯНСКАЯ, И. А. ДЕМЬЯНОВ, А. П. МУРАШОВ,
А. П. ГРИЩЕНКО

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ЖЕЛЕЗО-МЕДНЫХ ПОКРЫТИЙ С ПСЕВДОСПЛАВНОЙ СТРУКТУРОЙ

Проведены исследования триботехнических свойств электродуговых железо-медных псевдосплавных покрытий, определены объемный износ и коэффициент трения. Установлены факторы влияния технологических параметров электродугового напыления на износостойкость покрытий «железо-медь» и определен режим напыления для получения псевдосплавных железо-медных покрытий с максимальной износостойкостью. На основании триботехнических испытаний обнаружена и обоснована связь объемного износа с характеристиками микроструктуры покрытий, такими как соотношение в покрытии меди и железа и пористость напыленного слоя.

Ключевые слова: *псевдосплав «железо-медь», электродуговое напыление, покрытия, триботехнические испытания, объемный износ.*

Введение. Псевдосплавы (композиционные материалы на основе несмешивающихся компонентов) и покрытия с псевдосплавной структурой широко применяются при изготовлении узлов, работающих в условиях трения скольжения [1]. Спеченные фрикционные материалы на основе железа и меди (с содержанием меди от 10 до 90%) эффективно используются в тяжело нагруженных тормозных устройствах и фрикционных муфтах, что определяется их высокими износостойкостью, коэффициентом трения, теплостойкостью и теплопроводностью [2; 3]. Псевдосплавные покрытия, полученные методом электродугового напыления путем одновременного распыления разнородных проволок, характеризуются гетерогенной структурой, состоящей из смеси элементарных слоев напыляемых материалов, включений оксидов и пор. Напыленные покрытия отличаются высокой работоспособностью даже в условиях отсутствия смазочных материалов в зоне трения, что характерно для условий работы тяжело нагруженных узлов трения. Наиболее распространенными покрытиями, используемыми для этой цели, являются псевдосплавные покрытия типа Fe-Al, Fe-Cu, Cu-Al [1, 4]. Медно-стальные псевдосплавные покрытия применяются в качестве подшипниковых материалов, для повышения ресурса узлов трения судовых машин и механизмов [5]. Одним из примеров практического применения псевдосплавных покрытий «железо-медь» может служить использование их в качестве фрикционного материала для вагонной тормозной колодки.

Триботехнические свойства электродуговых покрытий, так же как и физико-механические, зависят от технологических параметров процесса напыления, путем изменения которых можно воздействовать на формирование микроструктуры покрытий и, тем самым, изменять их свойства [6].

Цель работы. Целью данной работы являлось изучение триботехнических свойств железо-медных покрытий с псевдосплавной структурой, полученных электродуговым методом при различных технологических параметрах напыления.

Методика дослідження. Псевдосплавні залізо-мідні покриття наносили електродуговим металізатором ЭМ-14М путем одночасного розпилення проволочок міді марки М1 (99,9% Cu) Ø2 мм і сталі Св08А (98,35 - 98,6% Fe) Ø2 мм. План проведення спроб по напыленню покриттів складений з застосуванням матриці планування дробного факторного експеримента 2^{4-1} з генеруючим співвідношенням $X_4=X_1X_2X_3$ (табл. 1) [7].

Таблиця 1

Матриця дробного факторного експеримента 2^{4-1}

Номер опыта	X_1	X_2	X_3	X_4
1	+	+	+	+
2	+	+	-	-
3	+	-	+	-
4	+	-	-	+
5	-	+	+	-
6	-	+	-	+
7	-	-	+	+
8	-	-	-	-

В якості змінних факторів обрані швидкість подачі проволочок $W_{пр}$, м/ч (X_1), напруга на електродах дуги U , В (X_2), витрата стиснутого повітря V_r , м³/ч (X_3) і відстань напылення L , м (X_4) (табл. 2). Во всіх спробах збереглися незмінними кут напылення – 90° і кут між електродами – 30°. Функцією відклику в плані експеримента являвся об'ємний знос покриття.

Таблиця 2

Інтервали варіювання і значення факторів електродугового напылення

Уровни варіювання	$W_{пр}$, м/ч	U , В	V_r , м ³ /ч	L , м
Верхній +	300	48	126	0,2
Нижній -	180	22	108	0,06
Основної 0	240	35	117	0,13
Інтервал варіювання	60	13	9	0,07

Робочий план, складений в відповідності з матрицею дробного факторного планування експеримента, представлений в табл. 3. В таблиці приведено значення удельного витрати енергії відносно маси витрачених проволочок ($IU/G_{пр}$, МДж/кг проволочки), що дозволяє судити про рівень тепловложения в напыляемый матеріал, а також характеристики покриттів (вміст оксидів в покритті MeO, об.%; пористість П, об.%; вміст міді в сумарному вмісті металічних складових, Cu, об.%; мікротвердість, H_{μ} , МПа), досліджені раніше [8].

Таблица 3

Матрица планирования эксперимента электродугового напыления покрытий железо-медь и характеристики полученных покрытий

№ о п ы т а	Параметры напыления				IU/G _{пр} , МДж/ кг про- воло- ки	MeO, об.%	П, об.%	Cu, об.%	H _ц , МПа
	W _{пр} , М/ч	U, В	V _г , м ³ /ч	L, м					
1	300	48	126	0,2	2,2	27	7	36	2280±120
2	300	48	108	0,06	2,2	20	10	33	2430±110
3	300	22	126	0,06	1	21	8	51	2250±110
4	300	22	108	0,2	1	25	6	48	2140±100
5	180	48	126	0,06	1,5	25	5	30	2410±140
6	180	48	108	0,2	1,5	22	13	29	2450±120
7	180	22	126	0,2	0,7	26	8	47	1970±110
8	180	22	108	0,06	0,7	21	6	48	2140±130

Определение содержания компонентов в покрытии, оксидов и пор проводилось при помощи программы обработки изображений «Image-Pro Plus». Микротвердость определяли на микротвердомере ПМТ-3.

Для исследования триботехнических характеристик покрытия напылялись на цилиндрические стальные образцы диаметром 11,4 мм, высотой 12 мм; толщина покрытий составляла 1,5 мм.

Оценка триботехнических свойств – коэффициента трения и износостойкости покрытий – была выполнена с помощью машины для испытаний на трение и износ на базе УМТ-1 по классической схеме «диск-колодка». Выбор условий испытаний основывался на моделировании условий торможения колеса тормозной колодкой.

Перед проведением основных испытаний покрытия прирабатывались на наждачной бумаге до приобретения характерного зеркального блеска на всей поверхности покрытия (R_a 2-2,5).

Испытания покрытий проводились в паре со сталью. В качестве контртела использовали диск диаметром 40 мм и шириной 12 мм из термообработанной стали 45 с твердостью 28-33 HRC, что соответствует твердости стали вагонного колеса, и отшлифованной до шероховатости R_a 0,32. Образец с покрытием, установленный в специальной оправке, прижимался к вращающемуся стальному образцу с заданным усилием. Нагрузка на образец и скорость вращения контртела оставались постоянными в процессе испытаний и составляли 70 Н/см² и 550 об/мин, соответственно. Продолжительность испытания – 10 мин, путь трения при этом составлял 0,7 км.

В процессе испытания каждые 15 секунд фиксировался коэффициент трения и температура нагрева образцов с покрытием. Коэффициент трения f рассчитывали, используя значения определенного в ходе экспериментов момента трения

$$f = \frac{M}{NR},$$

где M – момент трения, Нм; N – усилие прижатия образца, Р; R – радиус контртела, м. Температура образцов контролировалась с помощью термопары хромель-копель ТО-01А, зачеканенной в образец на расстоянии 1 мм от покрытия и

подключенной к мультиметру DT 835 (погрешность измерения 1 °С). До и после испытания каждого образца с покрытием проводилось их взвешивание на лабораторных весах KERN EMB 200-2 (погрешность измерения $\pm 0,01$ г).

Проводили по 10 испытаний каждого покрытия. В качестве характеристики износостойкости покрытий использовали их объемный износ ($I_{об}$, 10^{-3} см³)

$$I_{об} = \frac{1000(m_n - m_k)}{\rho},$$

где m_n – масса образца с покрытием до испытания, г; m_k – масса образца с покрытием после испытания, г; ρ – плотность покрытия, г/см³.

Результаты исследований и их обсуждение. Результаты триботехнических испытаний (объемный износ $I_{об}$, коэффициент трения f , средняя температура нагрева образцов при трении T_{cp}) псевдосплавных покрытий «железо-медь», напыленных электродуговым методом на различных режимах, представлены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты фрикционных испытаний псевдосплавных покрытий «железо-медь»

№ опыта	$I_{об}, 10^{-3}$ см ³	f	$T_{cp},$ °С
1	4,625±1,813	0,26	124
2	5,605±1,944	0,26	115
3	2,641±0,805	0,27	100
4	2,267±0,688	0,28	94
5	3,127±1,321	0,27	115
6	4,534±0,824	0,26	120
7	1,792±0,428	0,25	100
8	1,989±0,523	0,26	96

Из данных табл. 4 следует, что псевдосплавные покрытия, полученные при данных параметрах напыления, характеризуются устойчивым значением коэффициента трения, который лежит в пределах 0,25-0,28.

Для определения степени влияния отдельных параметров режимов процесса напыления на износостойкость покрытия (средний объемный износ покрытия $I_{об}$) с использованием данных, полученных при выполнении плана эксперимента согласно табл. 3 и 4, было составлено уравнение регрессии:

$$I_{об} = 2 + 0,0077 \cdot W + 0,0885 \cdot U - 0,0307 \cdot V - 0,0003 \cdot L$$

При сопоставлении экспериментальных результатов и расчетных данных (табл. 5) установлено, что уравнение регрессии с высокой (коэффициент корреляции 0,91) точностью описывает степень влияния параметров процесса напыления на объемный износ покрытий.

По данным вышеприведенного уравнения регрессии был построен график трендов, отражающих интенсивность влияния отдельных параметров процесса напыления на износостойкость покрытий в области использованных условий формирования покрытий (рис. 1).

Сопоставление характера и интенсивности влияния различных параметров процесса напыления на износостойкость получаемых покрытий (в выбранной области эксперимента), проведенное на основании показателей трендов (рис. 1), представлено в табл. 6.

Таблица 5

**Сопоставление экспериментальных и расчетных данных,
полученных из уравнения регрессии**

Номер образца	$I_{об\ эксп}, 10^{-3} \text{ см}^3$	$I_{об\ расч}, 10^{-3} \text{ см}^3$	$\Delta I_{об}, 10^{-3} \text{ см}^3$
1	4,625	4,641	-0,016
2	5,605	5,229	0,376
3	2,641	2,376	0,265
4	2,267	2,893	-0,625
5	3,127	3,753	-0,626
6	4,534	4,269	0,265
7	1,792	1,416	0,376
8	1,989	2,005	-0,015

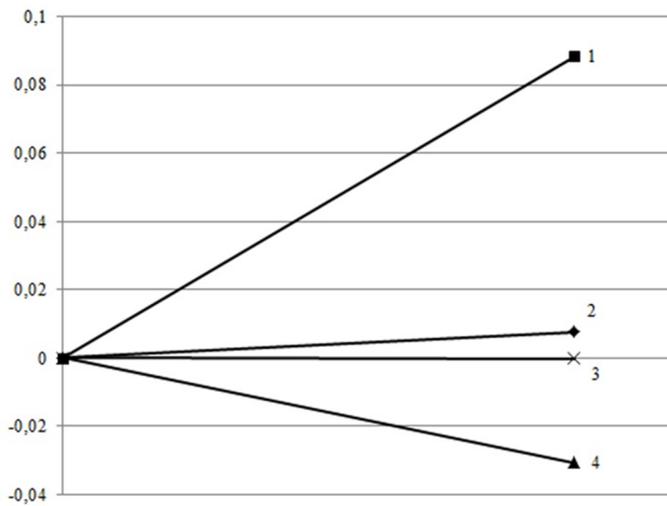


Рис. 1. Влияние параметров процесса электродугового напыления на износостойкость покрытий: 1 – U , В; 2 – W , м/ч; 3 – L , м; 4 – V , м³/ч

Таблица 6

**Характер влияния параметров процесса электродугового напыления
на износостойкость покрытий «железо-медь»**

	$W_{пр}$	U	V_T	L
Объемный износ	↑	↑↑↑	↓↓	↓

* ↑↑↑, ↓↓↓ — сильное; ↑↑, ↓↓ — умеренное; ↑, ↓ — слабое.

Данное регрессионное уравнение, связывающее параметры напыления с износостойкостью покрытия, показывает, что объемный износ покрытия увеличивается с увеличением напряжения на электродах и снижается с увеличением расхода сжатого воздуха. Таким образом, максимальной износостойкости псевдосплавных покрытий «железо-медь» можно добиться при следующих параметрах напыления: $U = 22$ В, $V_T = 126$ м³/ч. Изменение скорости подачи проволок в пределах 180-300 м/ч и дистанции напыления в пределах 0,06-0,2 м на износостойкость покрытий существенного влияния не оказывает.

На основе корреляционного анализа была определена статистическая зависимость износостойкости покрытий от удельного расхода энергии, затрачиваемого на нагрев проволок (показателя тепловложения в напыляемый материал). Максимальный объемный износ ($4,625$ и $5,605 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3$) наблюдается у образцов с покрытиями, полученными при напылении на режимах с максимальным показателем тепловложения в напыляемые материалы $2,2$ МДж/кг (опыты 1, 2), а минимальный износ ($1,792$ и $1,989 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3$) у образцов, напыленных с тепловложением $0,7$ МДж/кг (опыты 7, 8). Проанализировав статистическую взаимосвязь объемного износа с тепловложением в напыляемые проволоки было установлено, что объемный износ покрытий имеет тенденцию к увеличению с увеличением тепловложения в проволоки при напылении (рис. 2). Коэффициент корреляции (R) при этом составляет $0,94$. Статистическая зависимость (для принятой методики исследований) при доверительной вероятности $P = 0,9$ и количестве опытов $n = 8$ считается достоверной, если модуль коэффициента корреляции R превышает $0,6$.

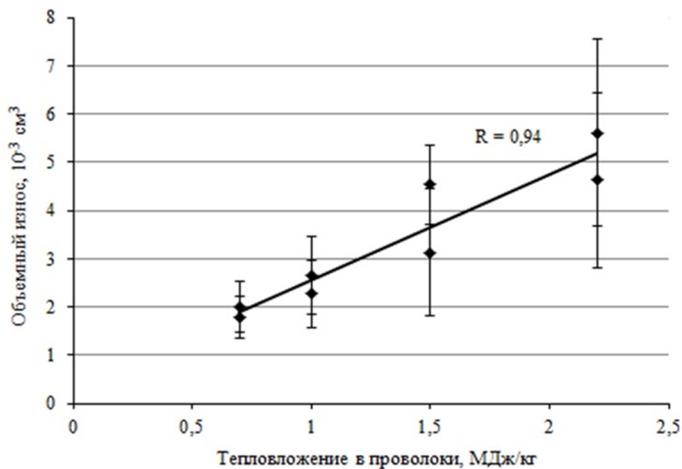


Рис. 2. Влияние тепловложения в проволоки на объемный износ покрытий «железо-медь»

Такая тенденция объясняется изменением содержания компонентов в покрытиях с изменением расхода энергии на нагрев проволок при напылении. Как было установлено в работе [8], при электродуговом напылении псевдосплавных покрытий из проволок меди и железа, изменение тепловложения в распыляемый материал приводит к изменению соотношения содержания медной и железной составляющих в покрытии. При напылении с тепловложением в проволоки $1,5$ - $2,2$ МДж/кг относительное содержание меди по отношению к железу составляет ~ 30 об.%, а при $0,7$ - $1,0$ МДж/кг составляет ~ 50 об.%. Вероятными причинами снижения содержания меди являются выгорание (испарение) и окисление меди в процессе распыления, ввиду ее перегрева выше точки плавления. На рис. 3 приведена микроструктура псевдосплавных покрытий «железо-медь» с содержанием меди (в суммарном содержании металлических составляющих) 33 об.% и 47 об.%, полученных при опыте 2 и 7, соответственно.

Так, испытания показали, что объемный износ покрытий с содержанием меди ~ 30 об.% (опыты 3, 4, 7, 8) составляет $3,133 - 5,605 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3$, что в среднем в 2 раза выше износа покрытий с ~ 50 об.% меди (опыты 1, 2, 5, 6), который состав-

ляет $1,792 - 2,638 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3$. Коэффициент корреляции объемного износа с содержанием меди в покрытии составляет $-0,77$. Отрицательный коэффициент корреляции (обратная корреляция) означает, что с уменьшением одного параметра другой увеличивается, в данном случае, с уменьшением объемной доли меди в покрытии объемный износ увеличивается (рис. 4).

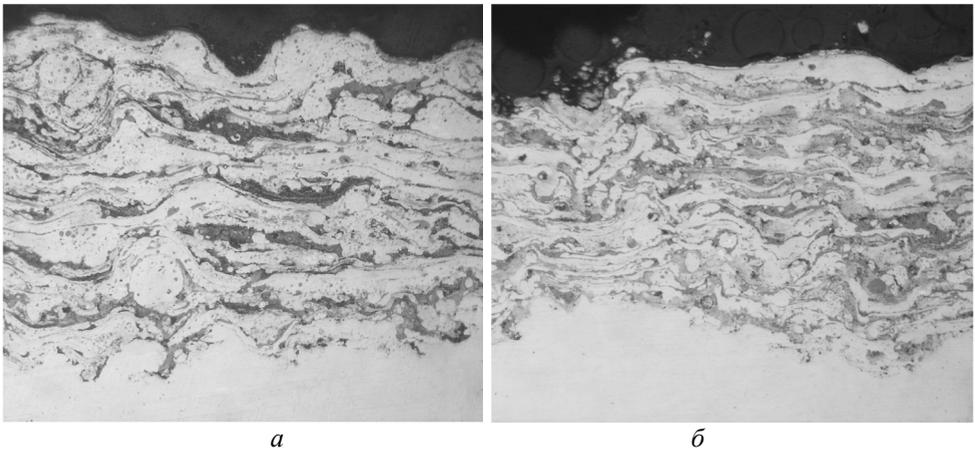


Рис. 3. Микроструктура покрытий «железо-медь» с содержанием меди: *a* – 33об.% (опыт 2); *б* – 47об.% (опыт 7)

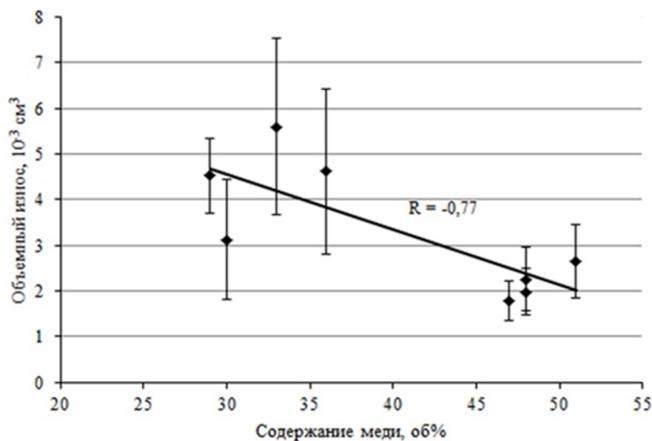


Рис. 4. Влияние содержания меди в покрытиях «железо-медь» на их объемный износ

Такая закономерность объясняется уменьшением площади контакта железной составляющей поверхности трения и подавлением процессов схватывания, которые возникают вследствие сродства железной составляющей покрытия и стали контртела. На поверхности трения покрытий, содержащих 30 об.% меди, в отдельных местах видны следы железных площадок, вытянутых параллельно поверхности трения (рис. 5, *a*), а треки на контртеле представляют собой отдельные бороздки касания железных площадок покрытия (рис. 5, *б*). Это говорит о том, что в процессе триботехнического взаимодействия возникают локальные очаги схватывания. Это сказывается, во-первых, на равномерности износа, во-вторых, в местах железных площадок возникают микровырывы, которые увеличивают износ покрытий.

*a**б*

Рис. 5. Поверхность трения: *a* – покрытия «железо-медь» с 30 об.% меди; *б* – контртела после испытаний покрытий с 30об.% меди

На поверхности трения покрытий, содержащих ~50об.% меди, слои железа и меди практически неразличимы (рис.6, *a*), а на поверхности контртела следов схватывания не выявлено (рис.6, *б*).

*a**б*

Рис. 6. Поверхность трения: *a* – покрытия «железо-медь» с 50об.% меди; *б* – контртела после испытаний покрытий с 50об.% меди

Внешний вид поверхностей трения покрытий говорит о том, что, ввиду того, что медь является более пластичным материалом (относительное удлинение меди – 50-60%, железа 40-50%), в процессе трения покрытий с содержанием 50 об.% меди происходит пластифицирование поверхностных слоев, нагрузка распределяется более равномерно по площади контакта и, следовательно, происходит равномерное изнашивание поверхности покрытия.

Содержание компонентов в псевдосплавных покрытиях также сказывается на тепловом режиме пары трения. Результаты триботехнических испытаний покрытий показали, что средняя температура образцов с покрытиями, содержащими ~50об.% меди на 15-30°C ниже температуры образцов с покрытиями, содержащими ~30об.% меди (табл. 4). Так как покрытие «железо-медь» с наличием меди в количестве ~50об.% имеет более высокую теплопроводность, по сравнению с покрытием, содержащим ~30об.% меди (расчет по уравнению аддитивности [9] – 246 Вт/м*град и 182 Вт/м*град, соответственно), оно обеспечивает более интенсивный отвод тепла в процессе работы, снижая температуру в контакте трущихся поверхностей. Повышение температуры поверхностных слоев трущихся тел при трении без смазки на воздухе приводит к изменению в них меха-

нических и фрикционных свойств, в частности уменьшению прочности и параметров фрикционно-контактной усталости, что повышает интенсивность изнашивания поверхности [10]. На рис. 7, 8 показано влияние содержания меди в покрытии на температуру нагрева образцов в процессе испытания и температуры нагрева на объемный износ покрытий. Из них следует, что снижение содержания меди в покрытии до 30об.% увеличивает температуру нагрева образцов, что приводит к падению износостойкости покрытий. Коэффициенты корреляции связи температуры нагрева образцов с содержанием меди в покрытиях и объемным износом составляют $-0,88$ и $0,84$, соответственно.

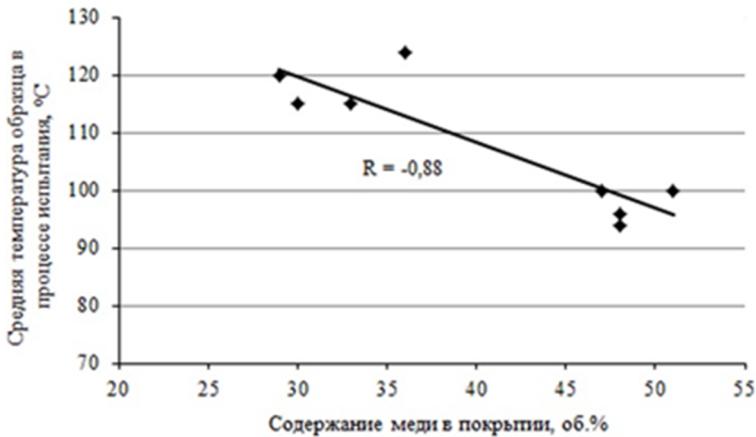


Рис. 7. Влияние содержания объемной доли меди в покрытиях «железо-медь» на среднюю температуру нагрева образцов с покрытиями в процессе трения

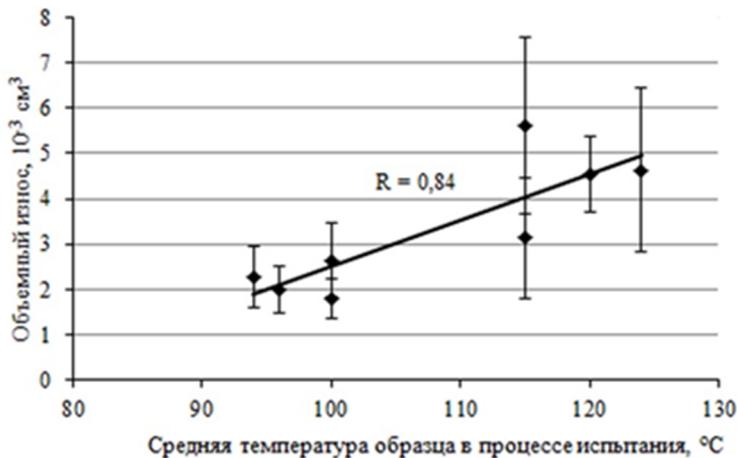


Рис. 8. Влияние средней температуры нагрева образцов с покрытиями «железо-медь» в процессе трения на объемный износ покрытий

Такая характеристика структуры поверхности газотермических покрытий как пористость играет положительную роль при жидкостном и граничном трении, так как хорошо удерживает смазку, однако при сухом трении скольжения поры являются зародышами микротрещин, что снижает когезионную прочность и износостойкость покрытий. Триботехнические испытания показали, что объемный износ псевдосплавных покрытий «железо-медь» увеличивается с увеличением пористости (рис. 9). Коэффициент корреляции этой зависимости равен $0,57$.

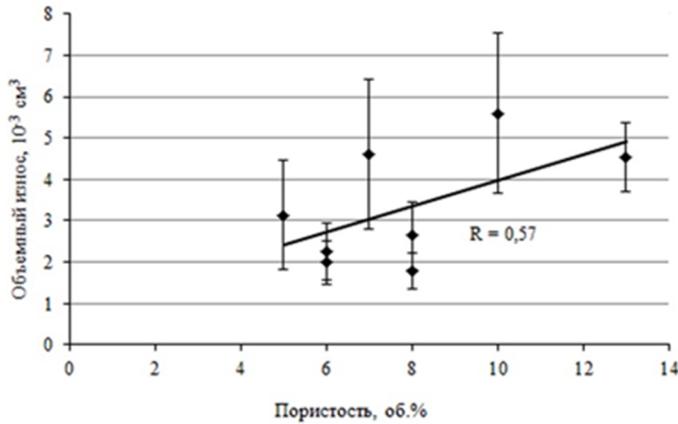


Рис. 9. Влияние пористости покрытия «железо-медь» на их объемный износ

С точки зрения свойств коэффициента корреляции объемный износ псевдосплавных покрытий «железо-медь» и такая характеристика микроструктуры, как содержание компонентов в покрытии, имеют высокую степень тесноты корреляционной связи ($|R| > 0,7$), а объемный износ и пористость покрытий - заметную степень тесноты корреляционной связи ($0,51 \leq |R| \leq 0,7$).

Согласно корреляционному анализу, объемный износ покрытия увеличивается с повышением твердости покрытий ($R=0,8$). Такая зависимость объясняется соотношением железа и меди в покрытиях, так как покрытия с содержанием меди ~50об.% имеют ниже твердость на 11%, чем покрытия с содержанием в них меди ~30об.% (1970-2250 МПа и 2280-2450 МПа, соответственно).

Роль оксидов в покрытии неоднозначна. С одной стороны они могут повышать износостойкость покрытий за счет более высокой твердости, чем исходные чистые металлы, с другой снижать работоспособность покрытий ввиду увеличения их хрупкости. В нашем случае влияние содержания оксидов в покрытии на объемный износ статистически недостоверно. Коefфіцієнт кореляції залежності об'ємного износа от содержания оксидов в покрытии не превышает значение 0,2, т.е. можно говорить о незначительности этой связи.

По результатам проведенных испытаний износостойкость электродуговых псевдосплавных железо-медных покрытий превышает износостойкость порошкового спеченного материала «железо-медь» с содержанием меди 50об.% в 2,5-3,5 раза, объемный износ которого в тех же условиях трения составляет $6,5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3$ [3]. Полученные данные триботехнических испытаний псевдосплавных покрытий «железо-медь» показали, что данные покрытия могут применяться при изготовлении деталей для эксплуатации в условиях сухого трения скольжения, в частности в качестве фрикционного материала вагонной тормозной колодки.

Выводы:

1. Результаты триботехнических испытаний в условиях сухого трения скольжения показали, что электродуговые псевдосплавные покрытия «железо-медь» характеризуются устойчивым значением коefфіцієнта трения в процессе работы в условиях пары «тормозная колодка - колесо», который лежит в пределах 0,25-0,28.

2. На основании результатов комплекса экспериментов по электродуговому напылению псевдосплавных покрытий «железо-медь», выполненных с приме-

нием метода математического планирования, проведен анализ влияния параметров напыления (скорости подачи проволоки, напряжения на электродах, расхода сжатого воздуха, дистанции напыления) на износостойкость получаемых покрытий. Установлено, что максимальная износостойкость псевдосплавных покрытий «железо-медь» достигается при параметрах напыления: $U = 22 \text{ В}$, $V_r = 126 \text{ м}^3/\text{ч}$. Изменение скорости подачи проволоки в пределах 180-300 м/ч и дистанции напыления в пределах 0,06-0,2 м на износостойкость покрытий существенного влияния не оказывает.

3. Путем корреляционного анализа установлена зависимость износостойкости железо-медных псевдосплавных покрытий с содержанием компонентов в покрытии и их пористостью. Так, износостойкость покрытий с содержанием объемной доли меди 50об.% в 2 раза превышает износостойкость покрытий с содержанием ~30об.% меди, что объясняется снижением температуры нагрева покрытий в процессе трения, а также уменьшением площади контакта железной составляющей поверхности трения и подавлением процессов схватывания. Пористость покрытий отрицательно сказывается на износостойкости покрытий, т.к. при сухом трении скольжения поры являются зародышами микротрещин, что снижает когезионную прочность и износостойкость покрытий.

4. Показано, что псевдосплавное покрытие железо-медь может применяться в качестве материала фрикционного назначения, который наряду с износостойкостью обеспечивает стабильность триботехнических свойств и уменьшает риск схватывания между трущимися деталями систем торможения, обеспечивая их безаварийную работу.

Список литературы

1. Восстановление и повышение износостойкости и срока службы деталей машин // Под ред. Попова В.С. – Запорожье, изд-во Мотор – Сич, 2000. – 394 с.
2. Гаршин А.П., Нилов А.С., Кулик В.И. и др. Анализ современных фрикционных материалов для тормозных колодок в высоконагруженных автомобильных системах торможения // Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка.: сб. докл. 8-го Междунар. симп. (Минск, 10-12 апр. 2013 г.). В 2 ч. Ч. 2 – Минск: Беларус. Навука, 2013. - С. 56-72.
3. Шакина, А.В. Исследования влияния состава и структуры железо-медных порошковых материалов на фрикционные свойства / А.В. Шакина, В.С. Фадеев, О.В. Штанов // Перспективные материалы. – 2014. – № 5. – С. 54–58.
4. Матвейшин, Е. Н. Прочностные и триботехнические свойства железо-алюминиевых и медно-алюминиевых металлизационных покрытий / Е.Н. Матвейшин // Проблеми трибології, 2009. - №4. С. 54-57.
5. Глебова М.А. Применение электродуговых покрытий из бронз и псевдосплавов для реновации и повышения ресурса узлов трения судовых машин и механизмов: автореф. дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук :05.08.04 / М. А. Глебова. - СПб., 2008. - 20 с.
6. Маркович С. І. Підвищення зносостійкості деталей машин електродуговим напиленням композиційних покриттів з застосуванням різномірних дрігів.: автореф. дис. ...канд. техн. наук : 05.02.04 / С.І. Маркович; Нац. авіаційний університет. – Київ, 2007. – 17 с.
7. Тамразов А. М. Планирование и анализ регрессионных экспериментов в технологических исследованиях / А.М. Тамразов. – К.: Наук. думка, 1987. – 176 с.
8. Борисов Ю. С. Исследование влияния режимов электродугового напыления на структуру и свойства псевдосплавных покрытий / Ю. С. Борисов, Н. В. Вигилянская, И. А. Демьянов, А. П. Грищенко, А. П. Мурашов // Автоматическая сварка. - 2013. - № 12. - С. 11-17.

9. Г.Н. Дульнев, Ю.П. Заричняк Теплопроводность смесей и композиционных материалов - Энергия, 1974. - 264с.

10. Трение, изнашивание и смазка. Справочник. В 2-х кн. Кн. 1 / Под ред. И. В. Крагельского и В. В. Алисина. — М.: Машиностроение, 1978. — 400 с.

Стаття надійшла до редакції 16.02.2018

*Ю. С. БОРИСОВ, Н. В. ВІГЛЯНСЬКА, І. А. ДЕМ'ЯНОВ, А. П. МУРАШОВ,
О. П. ГРИЩЕНКО*

ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ЗАЛІЗО-МІДНИХ ПОКРИТТІВ З ПСЕВДОСПЛАВНОЮ СТРУКТУРОЮ

Проведено дослідження триботехнічних властивостей електродугових залізо-мідних псевдосплавних покриттів, визначені об'ємне зношення і коефіцієнт тертя. Встановлено фактори впливу технологічних параметрів електродугового напилення на зносостійкість покриттів «залізо-мідь» і визначено режим напилення для отримання псевдосплавних залізо-мідних покриттів з максимальною зносостійкістю. На підставі триботехнічних випробувань виявлено та обґрунтовано зв'язок об'ємного зношення з характеристиками мікроструктури покриттів, такими як співвідношення в покритті міді і заліза і пористість напиленого шару.

Ключові слова: псевдосплав «залізо-мідь», електродугове напилення, покриття, триботехнічні випробування, об'ємне зношення.

Борисов Юрій Сергійович – докт. техн. наук, професор, завідувач відділу захисних покриттів, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона, вул. Казимира Малевича, 11, Київ, Україна, 03150, тел.: +38 044 206 11 71, E-mail: borisov@paton.kiev.ua

Вігліянська Наталія Вікторівна – молодший науковий співробітник, відділ захисних покриттів, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона, вул. Казимира Малевича, 11, Київ, Україна, 03150, тел.: +38 044 205 25 75, E-mail: pewinataliya@gmail.com

Дем'янов Іван Адамович – науковий співробітник, відділ захисних покриттів, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона, вул. Казимира Малевича, 11, Київ, Україна, 03150, тел.: +38 044 205 26 36, E-mail: demianov0415@gmail.com

Мурашов Анатолій Петрович – старший науковий співробітник, відділ захисних покриттів, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона, вул. Казимира Малевича, 11, Київ, Україна, 03150, тел.: +38 044 205 26 36, E-mail: anmurash@i.ua

Грищенко Олександр Петрович – молодший науковий співробітник, відділ захисних покриттів, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона, вул. Казимира Малевича, 11, Київ, Україна, 03150, тел.: +38 044 205 25 75, E-mail: grinya3679@gmail.com

YU. S. BORISOV, N. V. VIGILYANSKAYA, I. A. DEMIANOV, A. P. MURASHOV,
A. P. GRISHCHENKO

INVESTIGATION OF TRIBOTECHNICAL CHARACTERISTICS OF ELECTRIC ARC IRON-COPPER COATINGS WITH PSEUDO-ALLOY STRUCTURE

Investigations of tribotechnical characteristics of electric arc pseudoalloy iron-copper coatings under conditions of dry sliding friction were performed. Volumetric wear and friction coefficient were determined. A method of multifactor experiment planning was used for determination of spraying parameters (wire feed rate, arc voltage, air flow rate, spraying distance) influence on coatings wear resistance. The regression equation was received which shows that increasing of arc voltage leads to increase of volumetric wear of the pseudoalloy iron-copper coatings while increasing of atomizing gas flow rate leads to decrease of the volumetric wear. The maximum wear resistance of pseudoalloy iron-copper coatings was achieved using following spraying parameters: $U = 22$ V, $V_g = 126$ m³/h. Changing the wire feed rate in the range of 180-300 m/h and the spraying distance in the range of 0.06-0.2 m does not have a significant effect on the wear resistance of coatings. The statistical dependence of the volumetric wear on the characteristics of the coatings microstructure (oxides content, porosity, iron and copper content, microhardness) was analyzed. A high level correlation ratio of wear resistance with iron and copper content in the coating was found. The wear resistance of coatings with ~50vol.% of copper content is two times greater than the wear resistance of coatings with ~30vol.% of copper content. This can be explained by decreasing of the coatings heating temperature in friction process and also by decreasing of the iron component contact area of the friction surface and suppression of seizing.

Keywords: pseudoalloy iron-copper, electric arc spraying, coatings, tribotechnical tests, volumetric wear

References

1. Vosstanovlenie i povyshenie iznosostojkosti i sroka sluzhby detalej mashin // Pod red. Popova V.S. – Zaporozh'e, izd-vo Motor – Sich, 2000. – 394 s.
2. Garshin A.P., Nilov A.S., Kulik V.I. i dr. Analiz sovremennyh frikcionnyh materialov dlja tormoznyh kolodok v vysokonagruzhennyh avtomobil'nyh sistemah tormozhenija // Poroshkovaja metallurgija: inzhenerija poverhnosti, novye poroshkovye kompozicionnye materialy. Svarka.: sb. dokl. 8-go Mezhdunar. simp. (Minsk, 10-12 apr. 2013 g.). V 2 ch. Ch. 2 – Minsk: Belarus. Navuka, 2013, S. 56-72.
3. Shakina, A.V. Issledovanija vlijanija sostava i struktury zhelezo-mednyh poroshkovykh materialov na frikcionnye svojstva / A.V. Shakina, V.S. Fadeev, O.V. Shtanov // Perspektivnye materialy. – 2014, No 5, S. 54–58.
4. Matvejshin, E. N. Prochnostnye i tribotekhnicheskie svojstva zhelezo-aljuminievyh i medno-aljuminievyh metallizacionnyh pokrytij / E.N. Matvejshin // Problemi tribologii, 2009, No 4, S. 54-57.
5. Glebova M.A. Primenenie jelektrodugovyh pokrytij iz bronz i psevdosplavov dlja renovacii i povyshenija resursa uzlov trenija sudovyh mashin i mehanizmov: avtoref. diss. na soiskanie uchenoj stepeni kand. tehn. nauk :05.08.04 / M. A. Glebova. - SPb., 2008. - 20 s.
6. Markovich S. I. Pidvishhennja znosostojkosti detalej mashin jelektrodugovim napilennjam kompozicijnih pokrittiv z zastosuvannjam riznorodnih drotiv.: avtoref. dis. ...kand. tehn. nauk: 05.02.04 / S.I. Markovich; Nac. aviacijnij universitet. – Kiiv, 2007. – 17 s.
7. Tamrazov A. M. Planirovanie i analiz regressionnyh jeksperimentov v tehnologicheskijh issledovanijah / A.M. Tamrazov. – K.: Nauk. dumka, 1987. – 176 s.
8. Borisov Ju. S. Issledovanie vlijanija rezhimov jelektrodugovogo napylenija na strukturu i svojstva psevdosplavnyh pokrytij / Ju. S. Borisov, N. V. Vigiljanskaja, I. A. Dem'janov, A. P. Grishhenko, A. P. Murashov // Avtomaticheskaja svarka. – 2013, No 12, S. 11-17.
9. G.N. Dul'nev, Ju.P. Zarichnjak Teploprovodnost' smesej i kompozicionnyh materialov - Jenergija, 1974. – 264 p.
10. Trenie, iznashivanie i smazka. Spravochnik. V 2-h kn. Kn. 1 / Pod red. I. V. Kragel'skogo i V. V. Alisina. — M.: Mashinostroenie, 1978. — 400 s.