



ГАЗОТЕРМИЧЕСКОЕ НАПЫЛЕНИЕ ПСЕВДОСПЛАВНЫХ ПОКРЫТИЙ (Обзор)

Н. В. ВИГИЛЯНСКАЯ, инж., Ю. С. БОРИСОВ, д-р техн. наук, И. А. ДЕМЬЯНОВ, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрен опыт разработки и применения газотермических псевдосплавных покрытий, изложен принцип их формирования. Приведены характеристики наиболее используемых псевдосплавных покрытий и эффективность их практического применения в различных областях техники.

Ключевые слова: газотермическое напыление, электродуговое напыление, композиционное покрытие, псевдосплав, псевдосплавное покрытие, свойства покрытий, практическое применение

Разработка и внедрение новых высокоэффективных материалов и технологий для ремонта, повышения надежности и долговечности узлов и деталей различного назначения является актуальной задачей в области получения защитных композиционных покрытий.

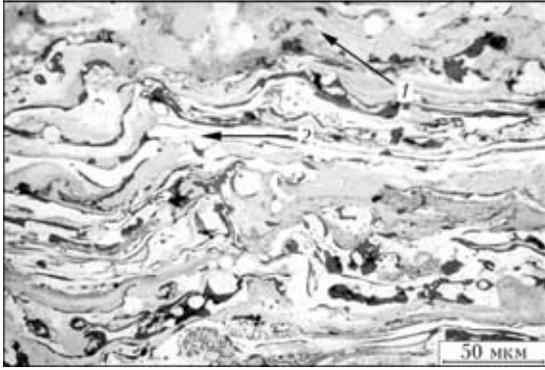
Композиционное покрытие — это гетерофазное покрытие, сформировавшееся в процессе нанесения, со структурой и свойствами, присущими композиционному материалу. Анализ процесса газотермического напыления (ГТН), структуры и физико-механических свойств композиционных покрытий показывает ряд преимуществ таких покрытий, в особенности высокую прочность, плотность, однородность, наличие фаз с особыми свойствами [1].

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 процессе нанесения многокомпонентного покрытия частицы каждого из наносимых металлов сохраняются в слое индивидуально, хотя при металлизации они и находились в расплавленном состоянии. Подобные многокомпонентные покрытия называют псевдосплавными. Материалы типа псевдосплавов характеризуются рядом важных свойств — сочетанием высоких значений температуры плавления и испарения с механической прочностью, твердостью, демпфирующей способностью, износостойкостью, способностью к самосмазыванию в условиях

сухого трения, а также высоким уровнем электро- и теплопроводности [2]. Требуемые свойства псевдосплавов получают путем изменения соотношения компонентов. На свойства псевдосплавов существенно влияют способы их изготовления: жидкофазное, твердофазное спекание, а также пропитка.

В настоящее время известен широкий спектр составов псевдосплавов с различными эксплуатационными свойствами. Так, псевдосплавы системы Ti–Mg (14–25 % Mg) отличаются хорошими антифрикционными свойствами и коррозионной стойкостью [3]. Псевдосплавы системы Fe–Cu (15...25 % Cu) характеризуются хорошими пластичностью, прочностью, термостойкостью. Из них изготавливают компрессорные лопатки, поршневые и уплотнительные кольца [3, 4]. Применение псевдосплавов системы Fe–Pb (10 % Pb, 2 % Sn, Fe — остальное) в основном обусловлено их хорошими антифрикционными свойствами. Из них изготавливают подшипники скольжения [4]. Псевдосплавы системы Fe–Mg (Fe-93 %, Mg-7 %) применяют для получения расходимых анодов с целью электрохимической защиты конструктивных материалов [3, 5]. Псевдосплавы системы W–Cu, W–Ag, Mo–Cu, Mo–Ag, Ni–Ag используют в электротехнике в качестве электроконтактных материалов, из них изготавливают сопла плазмотронов [6–10]. Из псевдосплавов системы Cu–Cr (35% Cr) получают электроконтакты вакуумных дугогасительных камер [11].

Теоретический и экспериментальный анализы показали возможность проведения предварительной расчетной оценки физических свойств композиционных материалов (КМ) и покрытий, таких как коэффициент термического расширения, коэффициент теплопроводности, модуль упругости [12]. На основе существующих подходов к расчету свойств КМ можно выполнить расчетно-аналитическую оценку прогнозируемых свойств механических смесей, к которым относится структура псевдосплавных газотермических покрытий. Последняя состоит из механической однородной



Микроструктура псевдосплавного покрытия системы Cu-NiCr: 1 — Cu; 2 — NiCr

смеси деформированных при ударе о поверхность основы частиц расплава (сплетов) толщиной в несколько микрометров и диаметром в десятки микрометров. Характерная структура псевдосплавного покрытия системы Cu-NiCr показана на рис. 1.

Расчетным методом можно определить коэффициент теплопроводности λ_n [13], модуль упругости E_n [11, 14] и коэффициент термического расширения покрытий α_n [11, 14]:

$$\lambda_n = \lambda_1 m_1 + \lambda_2 m_2,$$

$$E_n = E_1 V_1 + E_2 V_2,$$

$$\alpha_n = [\alpha_1 E_1 (1 - V_2) + \alpha_2 E_2 V_2] / [E_1 (1 - V_2) + E_2 V_2],$$

где λ_1, λ_2 — теплопроводность компонентов покрытия; m_1, m_2 — массовые доли компонентов покрытия; E_1, E_2 — модули упругости компонентов покрытия; V_1, V_2 — объемные доли компонентов покрытия; α_1, α_2 — температурные коэффициенты линейного расширения компонентов покрытия.

Покрытия с псевдосплавной структурой можно получить способами электроискрового легирования [15], ионно-плазменного магнетронного распыления [16] и ГТН (плазменным, газопламенным, электродуговой металлизацией). Способ электродуговой металлизации получил наибольшее распространение при нанесении псевдосплавных покрытий.

До настоящего времени нет необходимой справочной и регламентирующей литературы по эксплуатационным свойствам и технологии нанесения псевдосплавных электродуговых покрытий. Поэтому целью настоящей работы является установление и обоснование на базе аналитического обзора эффективности применения электродугового нанесения псевдосплавных покрытий при изготовлении и ремонте деталей.

Оборудование и материалы для ГТН псевдосплавных покрытий. Для напыления псевдос-

плавных покрытий были использованы следующие типы установок:

установки плазменного напыления УПУ-3, УПУ-4, УМП-5, УМП-6 [17] (с использованием порошковых материалов), в том числе плазматрон УШР-2 [18];

газовые металлизационные аппараты типа МГИ-2, МГИ-5 [17], МГИ-1-57, ГИМ-2 с удлинительной головкой УГ-2 [19];

двухпроводочные аппараты для электродугового напыления — стационарные (станочные) ЭМ-6, ЭМ-12, ЭМ-15, МЭС-1 и переносные (ручные) ЭМ-3, РЭМ-3А, ЭМ-9, ЭМ-10, ЭМ-14 [20];

трехпроводочные электродуговые металлизаторы УМА-1 [21], трехпроводочные головки МТГ и трехфазные аппараты ТМ-2 [22].

В трехпроводочных электрометаллизаторах (с моторным приводом ЭМ-6 и приставной трехпроводочной головкой МТГ) можно отдельно регулировать скорость подачи проволок [23].

Для ГТН псевдосплавных покрытий используются следующие порошки:

механические смеси компонентов (Al-Sn [18]), конгломерированные на каком-либо связующем веществе (механическая смесь порошков конгломерированного Al-Ni и молибдена [24]);

композиционные, состоящие из ядра основы, окруженного лакирующим слоем второго компонента (Al-Cu, Pb-Cu, Mo-Ni, Ag-Ni [24], Al-Mo [25]); лакирующий слой наносится либо химическим осаждением, либо вакуумным испарением.

Возможно также плазменное напыление псевдосплавных покрытий из порошков, полученных механическим легированием (Cu-Ta [26], Fe-Cu [27], Mo-Cu [28]).

При напылении псевдосплавных покрытий газопламенными металлизаторами применяют полиметаллические проволоки, состоящие из двух или трех металлов, располагающихся слоями, которые получают путем обертывания проволоки из одного металла ленточкой из другого металла и совместного протягивания через фильеру (алюминиево-свинцовую, медно-свинцовую) [29].

При использовании двух- и трехпроводочных электродуговых аппаратов для получения псевдосплавных покрытий в аппарат заправляют разнородные проволоки, диаметры и скорость подачи которых подбирают с учетом требуемого соотношения компонентов покрытия. Псевдосплавные покрытия формируются из смеси частиц разнородных металлов [23, 29]. При электродуговом напылении псевдосплавных покрытий используют материалы в виде проволок сплошного сечения (стальная, алюминиевая, латунная, цинковая, свинцовая, оловянно-свинцовая), порошковых проволок с металлической оболочкой (оболочка из сталей Св-08, Св-08Г2С, 30ХГСА, сталь 70, У8, У10, 20Х13, 40Х13, 65Г с различными наполнителями).



Антифрикционные псевдосплавные покрытия получают из стали, меди, свинца с присадкой алюминия, латуни и других металлов. Для повышения износостойкости применяют псевдосплавные покрытия на стальной основе с медью, латунью и алюминием, а также сталемolibденовые покрытия [29]. Для защиты от коррозии в основном применяют покрытия системы Zn–Al [19]. Количество второго металлического компонента в этих покрытиях может изменяться в пределах от 5 до 50 мас. %.

Процесс ГТН псевдосплавных покрытий. ГТН позволяет создавать псевдосплавные покрытия из несплавлиющихся металлов с требуемыми свойствами и широким диапазоном сочетания компонентов. При этой технологии возможно получение псевдосплавных покрытий и при использовании сплавообразующих компонентов. Короткое время контакта частиц компонентов (миллисекунды) не дает возможности развиться процессам взаимодействия.

При совместном распылении с помощью электродуговой металлизации металлов, отличающихся некоторой взаимной растворимостью или способных вступать в химическое взаимодействие, структура псевдосплавных покрытий характеризуется наличием твердых растворов различной концентрации или интерметаллидных фаз. Примером может служить псевдосплавное покрытие системы Al–Cu [30]. В случае совместного распыления металлов, не отличающихся заметной взаимной растворимостью, в структуре псевдосплавных покрытий обнаруживаются окисленные частицы исходных металлов. К таким покрытиям относятся Cu–Pb, Cu–сталь.

Специфическое строение псевдосплавного покрытия придает ему высокие антифрикционные свойства. Характерными чертами псевдосплавного покрытия являются гетерогенность и микропористость. Гетерогенность строения, наличие на поверхности слоя развитой шероховатости и пор (8...12 об. %) обеспечивают благоприятные условия для сохранения в процессе трения масляной пленки даже после прекращения подачи смазки.

Механические свойства псевдосплавного покрытия связаны с его строением и зависят от параметров процесса, которые меняют количество и форму залегания оксидов, размеры и форму частиц [31]. Так, увеличение давления воздуха при электродуговом напылении дает возможность получить более мелкозернистое строение слоя, но вызывает значительное окисление напыляемого материала покрытия. Дистанция напыления также оказывает большое влияние на физико-механические свойства покрытий. При увеличении дистанции от 25 до 300 мм степень окисления напыляемых частиц повышается и количество оксидов в слое увеличивается от 10 до 40 %. Кроме того, частицы достигают напыляемой поверхнос-

ти более охлажденными и, как следствие, снижаются прочностные характеристики покрытия (временное сопротивление при растяжении и сжатии — на 40 %, твердость — на 5...10 %) [31].

Физико-механические свойства псевдосплавных покрытий могут быть улучшены с помощью термообработки, которой подвергают псевдосплавные покрытия, состоящие целиком из тугоплавких металлов или содержащие их в преобладающем количестве, а также покрытия из цветных псевдосплавов. Последние (MC25, M75 ПОС30) после термической обработки имеют лучшую прирабатываемость [19]. Если в дуговом аппарате используют разнородные материалы в качестве анода и катода, возникает вопрос об анализе характера формирования струи напыляемого материала при одновременном распылении двух проволок (возможно ли их взаимодействие между собой в процессе напыления). В работе [32] проведен анализ частиц, полученных одновременным распылением стальной и медной проволок электродуговым аппаратом. Медь и железо почти не растворимы, и это может вызвать трудности для формирования твердого раствора между ними. Кроме того, в процессе начальной стадии плавления и отрыва с конца проволоки капли с двух проволок имеют малую возможность контакта из-за воздействия распыляющего газового потока. Между тем, после распыления частицы в процессе полета могут вступить в контакт между собой. Однако проведенные анализы показали, что контактное взаимодействие и растворимость двух материалов незначительны (в железной частице содержится 1,27 мас. % меди, в медной частице — 1,9 мас. % железа).

Технология нанесения псевдосплавных покрытий имеет некоторые недостатки, связанные с нарушением стабильности собственно процесса электродуговой металлизации ввиду разной скорости плавления проволок различного состава. Для их преодоления требуется разработка специальных мер (использование проволок различного диаметра или их подачи с разными скоростями, удаление оксидной пленки с проволок), что усложняет технологический процесс и ограничивает возможность регулирования состава покрытий.

Условия напыления, структура и свойства газотермических псевдосплавных покрытий. Антифрикционные псевдосплавные покрытия. Псевдосплавные покрытия, полученные способом электродугового напыления, применяемые в качестве антифрикционных материалов в узлах трения скольжения, имеют ряд преимуществ. Их структура, подобно металлокерамическим материалам, состоит из частиц металла, оксидов, нитридов и пор. Псевдосплавные покрытия хорошо и быстро прирабатываются и проявляют меньшую склонность к задирам по сравнению с другими антифрикционными покрытиями [33].

Таблица 1. Антифрикционные псевдосплавные покрытия и их свойства

Псевдосплавное покрытие	Состав, %	Твердость по Бринеллю при нагрузке 250 кг	Масловпитываемость, %	Прирабатываемость по отношению к баббиту Б83, %	Предельная нагрузка $\cdot 10^{-4}$, Н/м ² , при скорости скольжения, м/с	
					1	4
Al-сталь (АЖ50)	Al 48...50 Fe 50...52	37...44	10...14	58	1030	1079
Cu-сталь (МЖ50)	Cu 45...50 Fe 50...55	—	—	64	883	1128
Cu-сталь (МЖ75)	Cu 25...30 Fe 70...75	95...107	3,0...3,2	80	668	785
Латунь-сталь (ЛЖ75)	Cu 17...20 Zn 8...10 Fe 70...75	95...107	2,5...3,0	42	490	834
Cu-Pb (MC25)	Pb 25...30 Cu 70...75	35...37	—	47	1030	1373
То же, после термообработки	Pb 25...30 Cu 70...75	24...27	—	75	1962	2158
Cu-Sn-Pb (M75ПОС30)	Sn 2...3 Pb 6...7 Cu 90...91	25...28	—	80	1570	1619
Al-Pb (AC50)	Al 48...50 Pb 50...52	33...34	5,2	—	1760	1962

Таблица 2. Режимы напыления псевдосплавных покрытий электродуговыми аппаратами ЭМ-3А

Псевдосплавное покрытие	Давление сжатого воздуха $\cdot 10^{-4}$, Па	Напряжение на электродах, В	Производительность аппарата, кг/ч	Расстояние от сопла до поверхности детали, мм
Al-сталь (АЖ50)	49...59	20...40	2,0...2,4	100...125
Cu-сталь (МЖ75)	59...69	30...40	4,0...8,0	125...150
Латунь-сталь (ЛЖ75)	49...59	30...40	4,0...8,0	125...150
Al-Pb (AC50)	49...59	20...30	2,0...2,4	75...100

Составы наиболее употребляемых антифрикционных псевдосплавных покрытий и некоторые данные, характеризующие их свойства [29], приведены в табл. 1.

Таблица 3. Режимы напыления псевдосплавных покрытий трехпроволочным аппаратом (диаметр проволоки 2 мм; напряжение 20...40 В)

Материал покрытия	Массовая доля элемента, %	Скорость подачи проволоки, м/мин	Значение тока на каждой фазе, А	Производительность аппарата, кг/ч
Сталь	75	1,0...2,0	50...125	4,0...8,0
	Медь	25	0,6...1,2	
Сталь	75	1,0...2,0	75...150	4,0...8,0
	Латунь	25	0,6...1,2	
Алюминий	50	1,0...2,0	40...90	2,0...4,0
	Свинец	50	0,5...1,0	
Алюминий	30	1,0...1,2	90...110	3,0...3,6
	Сталь	70	1,3...1,6	
Алюминий	50	1,0...1,2	90...110	2,0...2,4
	Сталь	50	0,7...0,85	

Режимы напыления псевдосплавных покрытий электродуговыми аппаратами ЭМ-3А указаны в табл. 2 [29].

При напылении псевдосплавных покрытий электродуговым аппаратом ЭМ-6 с трехпроволочной головкой МТГ рекомендуются режимы, указанные в табл. 3 [23].

При напылении псевдосплавных покрытий газопламенным способом используют режимы, приведенные в табл. 4 [29].

В табл. 5 приводятся показатели физико-механических свойств псевдосплавных покрытий (в условиях жидкостного трения), полученных электродуговой металлизацией с использованием установки ЭМ-3А [19].

Псевдосплавные покрытия системы Cu-Pb, нанесенные с помощью трехпроволочного металлизатора, имеют характерное слоистое строение [30]. Особенностью структуры этих псевдосплавных покрытий является пористость. Специфичность структуры и характера связи между частицами покрытий системы Cu-Pb обуславливает относительно низкие значения их физико-механических свойств, для повышения которых приме-



Таблица 4. Режимы газопламенного напыления псевдосплавных покрытий (диаметр проволоки 1,5 мм)

Псевдосплавное покрытие	Производительность аппарата МГИ-1-57, кг/ч	Давление, Па	
		кислорода	горючего газа
Cu-Pb (MC25)	0,50...0,60	(2,5...5,0)10 ⁵	(0,35...0,75)10 ⁴
Al-Pb (AC50)	0,45...0,90	(2,5...5,0)10 ⁵	(0,35...0,75)10 ⁴

няется отжиг на спекание в восстановительной среде. При температуре отжига 900...940 °С в 10...15%-й смеси древесного угля и оксида алюминия через 3 ч концентрация поглощенного кислорода и пористость покрытий достигают минимума, а слоистая структура полностью исчезает. Такое изменение структуры псевдосплавных покрытий системы Cu-Pb способствовало существенному повышению их износостойчивости.

Независимо от способа подготовки поверхности отжиг значительно снижает прочность сцепления псевдосплавного покрытия с основой. В случае нанесения покрытия системы Cu-Pb на стальную основу, подготовленную путем нарезки рваной резьбы, прочность сцепления после отжига снижается до 3,8...4,6 МПа против 10,0...15,0 МПа до отжига из-за образования промежуточной пленки смеси оксидов меди и железа — Cu₂O, FeO и Fe₃O₄. Это привело к необходимости исключения прямого химического взаимодействия между компонентами псевдосплавного покрытия и сталью путем нанесения защитного подслоя из олова, латуни, никеля или меди. Применение медного подслоя позволило увеличить прочность сцепления покрытия системы Cu-Pb после отжига в 3...4 раза (табл. 6) [30].

Установлено, что по комплексу физико-механических и антифрикционных свойств, прочности сцепления и износостойчивости оптимальным, а также по составу является отожженное псевдосплавное покрытие с содержанием 25...30 % свинца [30]. Структура псевдосплавных покрытий системы Cu-сталь представляет собой смесь ламелей стальных и медных частиц, по границам которых располагаются оксиды и поры. Основанием для использования псевдосплавных покрытий системы Cu-сталь в качестве подшипникового материала является гетерогенность их структуры и изготовление из недефицитных металлов. Показано, что псевдосплавные покрытия системы Cu-сталь отличаются более высокой износостойкостью, чем покрытия из стали (табл. 5). Псевдосплавные покрытия Cu-сталь, содержащие 10...30 % меди, легко прирабатываются и эксплуатируются в условиях значительных нагрузок при невысокой температуре и низком коэффициенте трения. Недостатком псевдосплавных покрытий системы Cu-сталь является трудность их механической обработки, в частности, шавровки, из-за включений оксидов, нитридов, характеризующихся повышенной твердостью. Для улучшения свойств покрытия Cu-сталь предложено производить его термическую обработку (отжиг и нормализацию), что приводит к изменению формы частиц оксидов и снижению твердости покрытия от 1850 до 125 МПа [30].

Псевдосплавные покрытия системы Cu-Al, полученные способом газопламенного напыления, по структуре и содержанию оксидов существенно отличаются от аналогичных, выполненных способом электродуговой металлизации, поскольку при последнем происходит перегрев частиц исходного металла. В процессе газопламенного на-

Таблица 5. Физико-механические свойства псевдосплавных покрытий в условиях жидкостного трения

Псевдосплавное покрытие	Коэффициент трения при $v = 1...4$ м/с для удельного давления, МПа				Прирабатываемость*	Твердость по Бринеллю при $P = 250$ кг, $\delta = 5$ мм	Масловпитываемость, %
	50	100	150	200			
Al-сталь (АЖ50)	0,0049...0,0061	0,0045...0,0053	—	—	0,58	37...44	10...14
Cu-сталь (МЖ50)	0,0056...0,0063	0,0035...0,0036	—	—	0,64	—	—
Cu-Pb (MC25)	0,0044...0,0044	0,0037...0,0042	—	—	0,47	35...37	—
Cu-Pb (MC25) (термообработка)	0,0039...0,0045	0,0033	0,0030...0,0033	0,0032...0,0037	0,75	24...27	—
Cu-Sn-Pb (M75, ПОС30) (термообработка)	0,0039...0,0047	0,0033...0,0035	0,0028...0,0041	—	0,80	25...28	—
Al-Pb (AC50)	—	—	—	0,0041	—	33...34	5,2
Cu-сталь (МЖ75)	0,0056...0,0061	—	—	—	0,80	95...107	3,0...3,2
Латунь-сталь (ЛЖ75)	0,0065...0,0072	—	—	—	0,42	95...107	2,5...3,0
Сталь (Ж100)	0,0070...0,0133	—	—	—	0,73	107	1,8...2,0

* Прирабатываемость баббита марки Б83 принята за 1.

пыления температура расплавленных частиц соответствует кривой ликвидуса. Вследствие этого, а также благодаря значительной концентрации продуктов сгорания в газовом потоке, расплав не подвергается столь интенсивному насыщению кислородом [30].

Износостойкие псевдосплавные покрытия. Механизм формирования и особенности структуры электродуговых покрытий системы сталь 65Г – алюминий исследованы в работе [34]. В структуре продуктов при одновременном распылении электродных проволок из стали 65Г и алюминия зафиксированы все промежуточные фазы, образующиеся при взаимодействии железа с алюминием как в твердом, так и в расплавленном состоянии. Оптимальное сочетание свойств (умеренная микротвердость и достаточная пластичность), определяемое соответствующим составом интерметаллидов, отмечено в покрытиях с 10%-м содержанием алюминия.

Напыление сталеалюминиевого псевдосплавного покрытия с содержанием стали в напыляемом материале 50...65 мас. % и последующая его обработка давлением с обжатием позволяют получить оптимальную структуру покрытия, состоящую из жесткой арматуры (твердых частиц интерметаллидов, образующихся при напылении покрытия) и мягкой матрицы (алюминий, сталь), а также обеспечить в процессе обжатия пластическую деформацию мягкой составляющей, происходящую в результате отделения оксидных пленок с ее частиц. С ростом содержания стали в слое псевдосплава напряжения, приводящие к отделению оксидных пленок с поверхности частиц, увеличиваются. Отделение оксидных пленок способствует повышению когезионной прочности покрытия, в результате значительно увеличивается его износостойкость и, как следствие, повышается срок службы изделий с покрытиями [35].

Существует способ получения композиционных электродуговых покрытий из двух разнородных электродных материалов, одним из которых является низкоуглеродистая мягкая сталь, твердость которой не превышает 1500 МПа. В качестве второй проволоки используют порошковую систему легирования Fe–Cr–B–C [36]. Таким способом получают покрытия на основе сочетания серийных порошковых проволок системы Fe–Cr–B–C (ПП-АН-307) и цельнотянутых проволок Св-08 для восстановления деталей машин, поверхности трения которых работают в условиях граничного трения и абразивного износа. Повышенная износостойкость обусловлена наличием в покрытии большого количества кислорода, оксидов железа и бора, которые обеспечивают низкий уровень коэффициента трения, а наличие в покрытии боридов Fe₂B способствует его высокой износостойкости. Установлено, что в условиях абразив-

Таблица 6. Прочность сцепления покрытия системы Cu–Pb, нанесенного на омедненную низкоуглеродистую сталь, МПа

Содержание свинца в покрытии, мас. %	До отжига	После отжига
0	13,0	35,0
10	11,2	34,0
30	7,8	32,0
50	6,2	17,5

ного износа закрепленным абразивом износостойкость композиционного покрытия ПП-АН-307+Св-08 в 2,1 раза выше, чем у одноименных покрытий из порошковой проволоки АН-307, и в 1,4 раза выше, чем у стали ШХ-15 [37].

Коррозионностойкие псевдосплавные покрытия. Защиту от водной и атмосферно-водной коррозии можно обеспечить в случае использования псевдосплавных покрытий системы Zn–Al (1:1). При смачивании водой деталей с покрытием Zn–Al происходит интенсивное окисление цинка, и оксиды прочно закупоривают поры покрытия, прекращая тем самым доступ воды к основному металлу [19].

В работе [38] исследованы коррозионные свойства покрытий системы Zn–Al, полученных электродуговым способом с одновременным напылением проволок цинка и алюминия, а также напылением цинковой и порошковой проволок Al–5 мас. % Mg. Для испытаний использовали 3,5%-й раствор хлористого натрия. Исследования показали, что псевдосплавное покрытие Zn–Al имеет в 3 раза большую коррозионную стойкость, чем покрытия из цинковой или алюминиевой проволоки, а псевдосплавные покрытия системы Al–Mg–Zn 73% Zn–25,6% Al–1,4% Mg и 86% Zn–13,3% Al–0,7% Mg имеют стойкость против коррозии в 1,25 раза большую, чем псевдосплавные покрытия системы Zn–Al.

Опыт практического применения газотермических псевдосплавных покрытий. Псевдосплавные антифрикционные покрытия хорошо и быстро прирабатываются и проявляют меньшую склонность к задирам по сравнению с другими антифрикционными покрытиями. Псевдосплавные покрытия систем Al–сталь, Cu–сталь, Cu–Pb, Cu–Sn–Pb термообработанные и Al–Pb можно применять взамен оловянистых и безоловянистых бронз и баббитов в пределах допускаемых нагрузок и скоростей при спокойных нагрузках для неразрезных втулок, редукторов, трансмиссий, кранов, станочного оборудования, металлорежущих станков, вентиляторов, дымососов, компрессоров и центробежных насосов, работающих в паре с закаленным и незакаленным шейками [19].

Использование Cu–Pb покрытия в качестве антифрикционного материала является эффективным



на внутренних рабочих поверхностях стальных втулок [30].

Покрытие Cu–Al с массовой долей меди 20 % рекомендовано для подшипников скольжения, работающих в узлах металлорежущего оборудования и подъемно-транспортных устройств [30].

В работе [39] приведены результаты исследований по разработке износостойких покрытий для упрочнения и восстановления ступиц направляющих аппаратов погружных центробежных насосов типа ЭЦН. В качестве одного из вариантов покрытий опробован состав покрытия 20X13+AMг, полученный путем распыления проволок диаметром 1,6 мм на одинаковой скорости подачи.

Теплопроводность этих покрытий заметно выше, чем из стали 12X13, что должно сказываться на теплонапряженности в пятне контакта трущихся поверхностей. Хорошие результаты по всем исследованным параметрам также показало покрытие 12X13+08Г2С, выполненное из проволок диаметром 1,6 и 1,2...1,4 мм. Оно имеет ферритно-перлитную и мартенситную структуры с небольшим количеством карбидов, довольно плотное (пористость 6...7 %), состоит из равномерно распределенных по объему слоя структурных составляющих. Покрытие хорошо обрабатывается резанием даже при скорости до 6 м/с (600 об/мин). Содержание хрома в таких покрытиях несколько уменьшается и составляет примерно 8 %, тем не менее они отличаются удовлетворительной коррозионной стойкостью и сравнительно высокой износостойкостью [39].

Для повышения износостойкости поршней на их поверхность электродуговым способом напыляют псевдосплавное покрытие сталь–Al. С целью улучшения качества покрытия перед нанесением псевдосплавного слоя на него напыляют подслоя алюминия, который легко деформируется под влиянием усадочных напряжений, возникающих в нанесенном на него сталеалюминиевом псевдосплаве, предотвращая образование трещин и способствуя улучшению сцепления покрытия с основой [40].

В работе [41] описано электродуговое покрытие для поршневых компрессионных колец судовых среднеоборотных двигателей, представляющее собой псевдосплав сталь–бронза (60С2–Бр.КМц) с высокими триботехническими и адгезионными характеристиками. На основе результатов сравнительных триботехнических испытаний установлено, что при работе псевдосплавного покрытия 60С2 + Бр.КМц-3-1 в паре с материалом цилиндрической втулки (СЧ 25) до 20 % уменьшаются затраты мощности на преодоление сил трения; отмечен рост износостойкости материала поршневых колец (более чем в 5 раз) и втулки цилиндра (в 3 раза), что обеспечивает межремонтный период без переборки двигателя; зафиксировано существенное (на 50 % по нагрузке

задира) повышение стойкости трибосопряжения против задира.

В работе [42] на поршневые кольца цилиндрического тепловоза, изготовленные из высокопрочного чугуна, напылено псевдосплавное покрытие сталь–Mo, которое наносили способом двухпроволочной металлизации с независимой подачей проволок молибдена и стали. Кольца с покрытиями сняты и исследованы после 4000 ч работы. Изучение степени износа после эксплуатации показало, что в случае покрытия колец электролитическим хромом обнаружен больший износ, чем при псевдосплавном покрытии. Исследования поверхности износа показали, что в основном реализуется абразивный износ. Для молибденовой составляющей слоя во всех кольцах после эксплуатации отмечено повышение твердости по сравнению с исходным состоянием. Для стальных частиц зафиксированы повышение твердости по сравнению с исходным состоянием, в диапазоне HV 5000...6000 МПа, а также исчезновение частиц с твердостью HV 3000...4000 МПа. Предложенная технология ГТН покрытия способствует повышению срока службы поршневых колец и других деталей, работающих в условиях износа, и может использоваться для увеличения надежности и долговечности изделий, существенно изнашивающихся в процессе эксплуатации.

Выводы

1. Наиболее распространенным способом получения псевдосплавных покрытий является электродуговое напыление, поскольку отличается высокой производительностью и технологичностью. Толщина наносимого слоя может колебаться от 50...100 мкм до 3...6 мм и более. Состав покрытия регулируется изменением диаметров проволок и их скоростей подачи.

2. Приведенные данные практического применения псевдосплавных покрытий указывают на эффективное использование металлизационных псевдосплавных покрытий в качестве антифрикционных, износо- и коррозионностойких материалов.

3. Антифрикционные псевдосплавные покрытия применяют при изготовлении подшипников скольжения взамен бронз и баббитов для повышения работоспособности изделий в условиях абразивного износа как при первичном упрочнении, так и восстановлении деталей. Псевдосплавные покрытия Zn–Al используют для защиты от коррозии трубопроводов, цистерн, емкостей, металлоконструкций животноводческих комплексов кормоприготовительных цехов, агрохимического оборудования.

1. Газотермическое напыление композиционных порошков / А. Я. Кулик, Ю. С. Борисов, А. С. Мнухин, М. Д. Никитин. — Л.: Машиностроение, 1985. — 199 с.

2. *Энциклопедия неорганических материалов*. — Киев: Укр. сов. энцикл., 1977. — Т. 2. — 813 с.
3. *Композиционные материалы в технике* / Д. М. Карпинос, Л. И. Тучинский, А. Б. Сапожникова и др. — Киев: Техника, 1985. — 152 с.
4. *Андреева А. В.* Основы физикохимии и технологии композитов: Учеб. пособие для вузов. — М.: ИПРЖР, 2001. — 192 с.
5. *Shahparast F., Davies B. L.* A study of the potential of sintered iron-lead-tin alloys as bearing materials // *Wear*. — 1978. — № 1. — P. 145–153.
6. *Спеченные материалы для электротехники и электроники* / Под ред. Г. Г. Гнесина. — М.: Металлургия, 1981. — 344 с.
7. *Раковский В. С.* Спеченные материалы в технике. — М.: Металлургия, 1978. — 232 с.
8. *Скорород В. В., Солонин С. М., Чернышов Л. И.* Высокопористые вольфрам-медные материалы, полученные жидкофазным спеканием. Сообщ. 1 // *Порош. металлургия*. — 1978. — № 2. — С. 17–21.
9. *Скорород В. В., Солонин С. М., Чернышов Л. И.* Высокопористые вольфрам-медные материалы, полученные жидкофазным спеканием. Сообщ. 2 // *Там же*. — 1978. — № 10. — С. 89–92.
10. *Тихий Г. А., Качалин Н. И., Белова В. П.* Исследование псевдосплава Mo–Cu, полученного из механоактивированной шихты // *Металловед. и терм. обработка металлов*. — 2007. — № 9. — С. 25–29.
11. *Пименова Н. В.* Получение и исследование свойств композиционных материалов на основе меди: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Пермь, 2009. — 16 с.
12. *Карпинос Д. М.* Композиционные материалы. Справочник. — Киев: Наук. думка, 1985. — 592 с.
13. *Дульнев Г. Н., Заричняк Ю. П.* Теплопроводность смесей и композиционных материалов. — М.: Энергия, 1974. — 264 с.
14. *Миснар А.* Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций. — М.: Мир, 1968. — 464 с.
15. *Galinov I. V.* Investigation of the composition of Ag, Ni and Ag–Ni pseudoalloy coatings applied by electrospark alloying on a Cu substrate // *Surface and Coatings Technology*. — 1993. — **56**, № 2. — P. 131–135.
16. *Технологии нанесения покрытий* // www.inacotec.com/technology/
17. *Заляева Г. О.* Диагностика, ремонт, монтаж, сервисное обслуживание оборудования: Учеб.-метод. пособие. — Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2007. — 106 с.
18. *Универсальный плазматрон УШР-2 для напыления покрытий* // www.plasmacentre.ru/index.php
19. *Шашков А. Н.* Антифрикционные псевдосплавы. — М.: Машгиз, 1960. — Вып. 21. — 53 с.
20. <http://www.ai08.org/index.php/list/Технический+словарь+Том+I/3,Э.xhtml>
21. *Тылкин М. А.* Справочник термиста ремонтной службы. — М.: Металлургия, 1981. — 659 с.
22. <http://www.ai08.org/index.php/index/Технический+словарь+Том+I.xhtml>
23. *Металлизация распылением* / Н. В. Катц, Е. В. Антошин, Д. Г. Вадивасов и др. — М.: Машиностроение, 1966. — 200 с.
24. *Газотермические покрытия из порошковых материалов: Справочник* / Ю. С. Борисов, Ю. А. Харламов, С. Л. Сидоренко, Е. Н. Ардатовская. — Киев: Наук. думка, 1987. — 544 с.
25. *Хасуи А., Моригаки О.* Наплавка и напыление / Пер. с яп. В. Н. Попова. — М.: Машиностроение, 1985. — 240 с.
26. *Venugopal T., Prasad Rao K., Murty B. S.* Mechanical and electrical properties of Cu–Ta nanocomposites prepared by high-energy ball milling // *Acta Materialia*. — 2007. — **55**, № 13. — P. 4439–4445.
27. *Wille C. G., Tala'at Al-Kassab, Kirchheim R.* Time evolution of morphology in mechanically alloyed Fe–Cu // *Ultramicroscopy*. — 2011. — **111**, № 6. — P. 730–737.
28. *Mechanochemical synthesis of Mo–Cu nanocomposite powders* / Aokui Sun, Dezhi Wang, Zhuangzhi Wu, Qijun Cheng // *J. of Alloys and Compounds*. — 2011. — **509**, № 5. — P. 74–77.
29. *Катиц Н. В.* Восстановление деталей текстильных машин металлизацией. — М.: Легкая индустрия, 1968. — 191 с.
30. *Сложные металлизационные псевдосплавы как подшипниковые материалы* / Л. В. Красниченко, А. И. Смолянинов, Е. Г. Подкович, В. М. Таратин // *Применение новых материалов в сельскохозяйственном машиностроении: Сб. ст.* — Ростов-на-Дону, 1966. — С. 3–20.
31. *Красниченко Л. В.* Современная технология металлизации распылением. — М.: Трудрезервиздат, 1958. — 94 с.
32. *Size distribution of particles from individual wires and the effects of nozzle geometry in twin wire arc spraying* / H. L. Liao, Y. L. Zhu, R. Bolot et al. // *Surface and Coatings Technology*. — 2005. — **200**, № 7. — P. 2123–2130.
33. *Применение новых материалов в сельскохозяйственном машиностроении: Межвуз. сб. науч. тр.* / Под ред. В. В. Рубанова. — Ростов-на-Дону: РИСХМ, 1991. — 107 с.
34. *Особенности формирования и структура электрометаллизационных покрытий системы сталь–алюминий* / А. Л. Борисова, Б. Г. Губенко, В. А. Костин и др. // *Автомат. сварка*. — 1990. — № 8. — С. 41–44.
35. *Пат. 2063470 РФ, МПК С 23 С 4/18, С 23 С 4/04.* Способ получения газотермических покрытий / А. Е. Титлянов, А. Г. Радюк, С. И. Педос. — Оpubл. 10.07.1996; Бюл. № 7.
36. *Пат. 19967 Украина, МПК С 23 С 4/00.* Спосіб одержання композиційних електродугових покриттів. — Оpubл. 15.01.2007; Бюл. № 1.
37. *Маркович С. І.* Підвищення зносостійкості деталей машин електродуговим напыленням композиційних покриттів з застосуванням різнорідних дротів: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — К., 2007. — 17 с.
38. *Thermally sprayed composite coatings for enhanced corrosion protection of steel structures* / T. Lester, D. J. Kinglerley, S. J. Harris, S. P. Mathews // *Proc. of the 15th ITSC (Nice, France, 25–29 May)*. — Nice, 1998. — Vol. 1. — P. 49–55.
39. *Исакаев Э. Х., Гусев В. М., Мордынский В. Б.* Повышение ресурса деталей с газотермическими покрытиями нефтепромыслового оборудования // *Технология машиностроения*. — 2008. — № 12. — С. 18–22.
40. *Пат. 291994 СССР, МПК С 23 С 7/00.* Способ повышения износостойкости поршней / А. И. Пономарев, З. А. Макаева, Н. В. Комлюков и др. — Оpubл. 06.01.71; Бюл. № 4.
41. *Ефремов С. Ю.* Повышение ресурса поршневых компрессионных колец при изготовлении сменно-запасных частей в судоремонте: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Новгород, 2005. — 19 с.
42. *Неразрушающий метод контроля поршневых колец после обкатки и эксплуатации* / А. И. Пятак, А. П. Любченко, Д. Б. Глушкова, В. П. Тарабанова // *Мир техники и технологий*. — 2010. — № 1. — С. — 126–128.

The paper presents the experience of development and application of thermal pseudoalloy coatings, and describes the principle of their formation. Characteristics of the most widely applied pseudoalloy coatings and the effectiveness of their practical application in different fields of engineering are given.

Поступила в редакцию 05.09.2011