



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
ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Проведено исследование влияния условий электродугового напыления на структуру и свойства псевдосплавного покрытия сталь-медь. Для определения степени влияния факторов напыления на характеристики покрытия использовали метод многофакторного планирования эксперимента. Анализ сплетов показал, что при всех исследуемых режимах напыления при столкновении с основой капли металла находятся в жидком состоянии. Получены регрессионные уравнения, связывающие технологические режимы напыления (скорость подачи проволок, напряжение, расход сжатого воздуха, дистанция напыления) с твердостью, содержанием в покрытии стальной и медной составляющих, оксидов и пор. Установлено, что в покрытиях, полученных распылением проволок стали и меди одинакового диаметра, содержание меди в общем объеме покрытия зависит от тепловложения в распыляемый материал и при 0,6...1,0 МДж/кг составляет около 35 об. %, а при 1,4...2,2 МДж/кг около 22 об. %. Вероятными причинами снижения содержания меди являются выгорание (испарение) и окисление меди в процессе распыления ввиду ее перегрева выше точки плавления. Наиболее действенным методом сокращения потерь меди за счет ее выгорания при напылении псевдосплавного покрытия сталь-медь является снижение степени нагрева напыляемых частиц и увеличение их скорости за счет увеличения расхода сжатого воздуха и снижения тепловложения в распыляемый материал. Наилучший комплекс структуры и свойств электродуговых псевдосплавных покрытий сталь-медь по показателям сохранения соотношения компонентов (1:1), пористости (8 об. %), степени окисления (21 об. %) и твердости (2700 МПа) получили в случае напыления при тепловложении в проволоку 1,0 МДж/кг и расходе сжатого воздуха 126 м³/ч. Библиогр. 22, табл. 2, рис. 8.

Ключевые слова: электродуговое напыление, псевдосплавные покрытия, микроструктура, пористость, окисление, микротвердость

Процесс электродугового напыления характеризуется большим количеством факторов, оказывающих влияние на эксплуатационные свойства покрытий. Для управления свойствами получаемых покрытий необходимо проводить исследование влияния этих факторов на процесс образования покрытий.

Механические свойства покрытий, полученных электродуговым напылением, связаны с их строением и находятся в зависимости от режимов напыления, которые изменяют микроструктуру покрытий (содержание в покрытии оксидов и пор).

Оксиды в покрытии играют двоякую роль. С одной стороны они в значительной мере повышают износостойкость покрытия, так как в основном имеют более высокую твердость, чем исходные чистые металлы. В то же время имеется некоторое критическое количество оксидов, превышение которого скачкообразно снижает работоспособность покрытия под воздействием внешних нагрузок, так как увеличивается его хрупкость [1]. Наличие пористости в покрытиях снижает износостойкость при сухом трении [2], однако поры играют положительную роль в антифрикционных покрытиях, обеспечивая благоприятные условия

для сохранения в процессе трения масляной пленки [3].

Большинство исследователей сходится во мнении, что повышение давления распыляющего газа способствует снижению пористости покрытий [4]. При увеличении давления распыляющего газа увеличивается дисперсность распыляемого материала (алюминия, стали, меди) [5, 6] и скорость движения частиц [7], что ведет к формированию более плотной однородной структуры покрытий. Изменение скорости подачи проволок, напряжения на электродах и дистанции напыления незначительно влияет на размер распыляемых частиц (алюминий, сталь-медь) [5]. Уменьшение напряжения горения дуги приводит к некоторому смещению размера напыляемых частиц в область более мелких фракций при распылении проволок стали, меди или алюминия [6, 8, 9]. Увеличение тока дуги со 150 до 200 А ведет к уменьшению пористости покрытия на 1,5...2,0 % [10].

Однако с увеличением давления распыляющего газа увеличивается содержание оксидов в покрытии, так как с уменьшением размера напыляемых частиц происходит более интенсивное их взаимодействие с кислородом [11]. При увеличении диаметра час-



тиц от 10 до 237 мкм степень окисления капель уменьшается примерно на 30 % [12].

С увеличением дистанции напыления от 25 до 300 мм содержание оксидов в покрытии увеличивается с 10 до 40 % за счет увеличения времени взаимодействия частиц с кислородом в струе [3].

При использовании электродуговых покрытий в качестве износостойких материалов важным свойством покрытий является твердость, которая определяется условиями формирования слоя при распылении металла. При увеличении давления распыляющего газа твердость покрытия увеличивается ввиду формирования более плотного покрытия [13]. Покрытия из проволоки с низким содержанием углерода приобретают твердость вследствие большого количества оксидов [2]. При применении высокоуглеродистых проволок твердость покрытия возрастает с увеличением расстояния до 100 мм, а затем при дальнейшем увеличении расстояния твердость уменьшается вследствие увеличения содержания пор в покрытиях. При повышении давления сжатого воздуха с 3 до 7 атм. при применении высокоуглеродистых проволок твердость покрытий увеличивается с *HV* 193 до *HV* 207. С увеличением подачи проволоки, а следовательно силы тока, твердость понижается.

При электродуговом напылении процесс плавления и отрыва капель с проволок анода и катода происходит неодинаково [5, 14]. При использовании разнородных проволок в случае напыления псевдосплавных покрытий на процесс несимметричного расплавления, формирования и отрыва капель также оказывает влияние разница в скоростях плавления проволок (ввиду разницы температур плавления этих материалов). Это ведет к формированию неравномерной микроструктуры. В работе [15] показана неравномерность распределения компонентов покрытия по пятну напыления при распылении проволок стали и меди.

При напылении псевдосплавных покрытий равномерность распределения компонентов является важной характеристикой.

Целью настоящей работы является изучение влияния рабочих параметров электродугового напыления на микроструктуру (пористость, степень окисления, однородность распределения компонентов) и твердость псевдосплавных покрытий сталь–медь.

Методика проведения эксперимента. При исследовании процесса формирования псевдосплавных покрытий, получаемых одновременным распылением разнородных проволок, в качестве материалов использовали проволоки диаметром 2 мм меди марки М1 и стальную Св08А. Нанесение покрытий проводили электродуговым металлизатором ЭМ-14М с источником питания ВДУ-506. Для установления характера взаимосвязи между условиями распыления проволок и структурой псевдосплавных покрытий использовали метод математического планирования эксперимента [16]. В качестве изменяемых факторов выбрали следующие параметры: скорость подачи проволок $w_{пр}$, м/ч; напряжение на электродах дуги U , В; расход сжатого воздуха V_r , м³/ч (давление сжатого воздуха, атм); дистанция напыления H , м. Выбор основывался на том, что эти факторы оказывают наиболее существенное влияние на структуру и качество покрытий [2, 5]. Для четырехфакторного эксперимента использовали полуреплику 2^{4-1} . Условия проведения эксперимента сведены в матрицу планирования (табл. 1). Для анализа процесса напыления проволок в табл. 1 введены величины мощности дуги P , комплексы параметров, характеризующие удельный расход энергии на нагрев газа IU/V_r и проволоки $IU/G_{пр}$, которые позволяют определить уровень тепловложения в напыляемый материал и газовую струю. Получаемые численные величины показателей IU/V_r и $IU/G_{пр}$ относятся к предельным

Таблица 1. Матрица математического планирования эксперимента*

Номер опыта	Параметры напыления				Мощность P , кВт	IU/V_r , МДж/м ³ газа	Расход проволок $G_{пр}$, кг/ч	$IU/G_{пр}$, МДж/кг проволоки	$d_{част.}$, мкм [6]	S , м ² /кг	H/V_r , ч/м ² ·10 ⁻⁶
	$w_{пр}$, м/ч	U , В	V_r , м ³ /ч (давление, атм.)	H , м							
1	300	48	126 (7)	0,20	9,8	0,28	15,8	2,2	37	19,4	15,9
2	300	48	108 (6)	0,06	9,8	0,33	15,8	2,2	42	17,1	5,6
3	300	22	126 (7)	0,06	4,4	0,13	15,8	1,0	40	17,9	4,8
4	300	22	108 (6)	0,20	4,4	0,15	15,8	1,0	52	13,8	18,5
5	180	48	126 (7)	0,06	3,8	0,11	9,5	1,4	46	15,6	4,8
6	180	48	108 (6)	0,20	3,8	0,13	9,5	1,4	52	13,8	18,5
7	180	22	126 (7)	0,20	1,7	0,05	9,5	0,6	45	15,9	15,9
8	180	22	108 (6)	0,06	1,7	0,06	9,5	0,6	54	13,3	5,6

* Количество теплоты, необходимое для расплавления проволок, 0,49 МДж/кг.



значениям использования энергии электрической дуги. В случае IU/V_r предполагается, что она полностью затрачивается на нагрев распыляющего газа, а в случае $IU/G_{пр}$ — на нагрев распыляемой проволоки. Данные показатели предназначены для качественной оценки условий процесса электродугового напыления. Для оценки протекания процесса окисления частиц напыляемого материала в табл. 1 представлены расчет их удельной реакционной поверхности S и показатель времени их пребывания в струе H/V_r .

Граничные условия факторов выбраны из анализа предыдущих экспериментов и опыта электродугового напыления покрытий из проволочных материалов [17, 18]. Значение тока было связано с изменением скорости подачи проволок и составляло 80 А при скорости подачи 180 м/ч и 200 А при скорости 300 м/ч. Кроме указанных изменяемых факторов постоянными оставались такие факторы, как угол напыления — 90°, угол между электродами — 30°.

Для исследования состояния частиц в момент соударения их с основой проводили сплет-тест по методике, описанной в работе [13]. Напыление сплетов проводили на пластины из полированной нержавеющей стали размером 50×30×1 мм посредством перемещения металлатора. Для определения скорости частиц в процессе электродугового распыления проволочных материалов использовали измеритель скоростей светящихся объектов ИССО-1 [19].

Для исследования микроструктуры покрытия напыляли на образцы из Ст3 размером 20×15×3 мм. Перед напылением образцы подвергались пескоструйной обработке. Толщина покрытия составляла 500...700 мкм.

Все эксперименты проводили на режимах, соответствующих плану эксперимента. Микроструктуру покрытий и внешний вид сплетов исследовали на металлографическом микроскопе «Neophot-32».

Определение содержания компонентов в покрытии, оксидов и пор проводили с помощью программы обработки изображений «Atlas». Микротвердость определяли на микротвердомере ПМТ-3. Замеры проводили по всему сечению покрытий.

Результаты эксперимента. Анализ результатов проводили с учетом показателей процесса тепловложения в газ и проволоку и условий взаимодействия частиц с газовой средой (табл. 2).

Исследование формы частиц расплава после соударения с поверхностью (сплет-тест). Анализ сплетов, полученных одновременным распылением проволок меди и стали, показал, что при всех опытах частицы имеют звездообразную форму (рис. 1).

Такой тип сплетов получается из частиц, находящихся в момент соударения с основой в жидком состоянии, т. е. при полете на дистанции напыления частицы не затвердевают, что объясняется кратковременностью полета [20]. Измерение скорости частиц показало, что в момент соударения частиц с основой их скорость составляет около 100 м/с. При дистанции напыления 0,06...0,2 м время пребывания частиц в струе равно 0,6...2,0 мс.

Цвет медной составляющей на сплетах, полученных при опытах № 1 и 2, свидетельствует о ее перегреве, что, по-видимому, вызвано сочетанием максимальных тепловложений в струю и проволоку (табл. 2, опыты № 1 и 2), приводящему к разогреву металла до более высокой температуры. Разбрызгивание частиц, наблюдаемое на сплетах № 1, 2, 5, 6, свидетельствует о их перегреве, связанным с этими же причинами.

Исследование микроструктуры псевдосплавных покрытий сталь-медь. Анализ структуры покрытий, полученных одновременным распыле-

Таблица 2. Показатели процесса тепловложения в газ и проволоку и условия взаимодействия частиц с газовой средой

Номер опыта	Тепловложение в струю IU/V_r , МДж/м ³			Тепловложение в проволоку $IU/G_{пр}$, МДж/кг				Размер удельной реакционной поверхности частиц S , м ² /кг			Показатель времени пребывания частиц в струе H/V_r , ч/м ² ·10 ⁻⁶	
	0,28...0,33	0,11...0,13	0,05...0,06	2,2	1,4	1,0	0,6	17...19	15...16	13...14	16...19	5...6
1	×			×				×			×	
2	×			×				×				×
3		×				×		×				×
4		×				×				×	×	
5		×			×				×			×
6		×			×					×	×	
7			×				×		×		×	
8			×				×			×		×

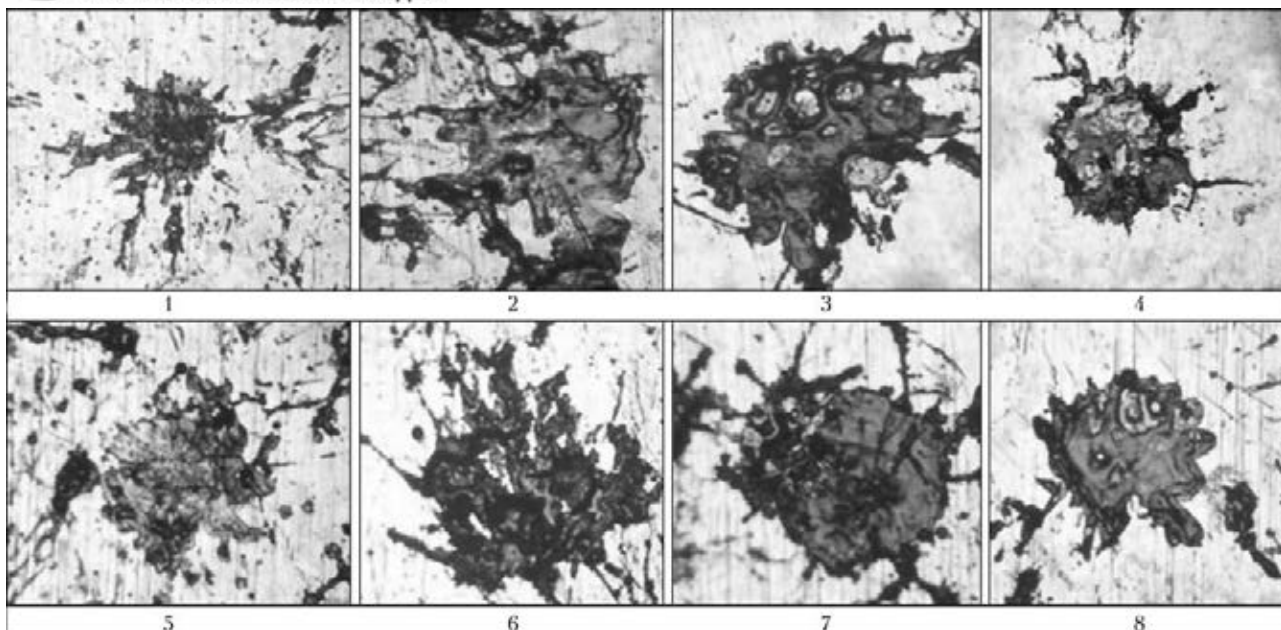


Рис. 1. Сплеты частиц, полученных одновременным распылением проволок меди и стали при использовании условий напыления согласно матрице табл. 1 (1–8 — номера опытов)

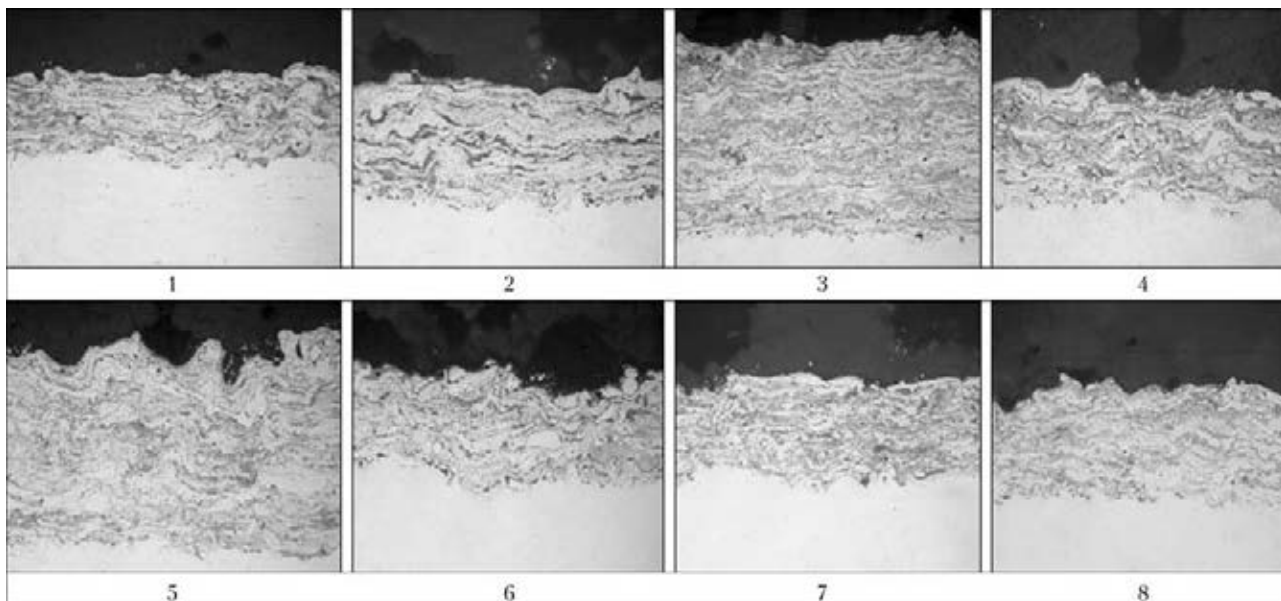


Рис. 2. Микроструктура ($\times 200$) покрытий сталь–медь (1–8 — номера опытов)

нием проволок стали и меди, показал, что в данном диапазоне режимов напыления все покрытия плотные с выраженной ламелярностью структуры (рис.2). Такой вид структур характерен для покрытий, сформированных из частиц, находящихся в момент соударения с основой в жидком состоянии и имеющих достаточно большую скорость, что согласовывается с результатами исследования сплетов.

В табл. 3 приведено содержание компонентов в покрытии, степень окисления и пористость.

Анализ содержания компонентов в покрытиях показал, что в результате напыления происходит изменение в относительном содержании в покрытиях стали и меди. Содержание меди в распыляемом материале при равных диаметрах рас-

пыляемых проволок (2 мм) составляет 50 об. %. Так, при высоких значениях величин тепловложения в проволоку (табл. 2, опыты № 1, 2, 5, 6), что соответствует значениям 2,2 и 1,4 МДж/кг, процентное содержание меди в суммарном содержании медной и стальной составляющих составляет 36, 33, 30, 29 об. % соответственно. При снижении этого тепловложения до 1,0 МДж/кг (опыты № 3, 4) и 0,6 МДж/кг (опыты № 7, 8) процентное содержание меди в суммарном содержании медной и стальной составляющих покрытия повышается до 51, 48, 47, 48 об. % соответственно.

Данное явление очевидно связано с тем, что в процессе напыления температура расплавленных частиц может значительно превышать тем-



пературу плавления меди [5] и достигать температуры кипения 2800 К. Так как температуры кипения и упругости паров меди и железа различны (давление пара меди (113 Па) по сравнению с железом (13,3 Па) более высокое [21]), повышенный расход энергии на нагрев проволок (табл. 2, опыты № 1, 2, 5, 6) приводит к более интенсивному нагреву медной проволоки при расплавлении и, очевидно, к ее частичному испарению в процессе напыления. Условия, обусловленные свойствами электрической дуги (электродинамические силы, действующие в области дугового разряда), также способствуют переходу частиц меди в газовую фазу [21, 22].

Другой возможной причиной снижения содержания медной составляющей может являться более интенсивное по сравнению с железом окисление меди в процессе напыления.

Увеличение расхода сжатого воздуха и скорости подачи проволоки ведет к сохранению содержания меди в покрытии. Это может объясняться тем, что увеличение расхода сжатого воздуха и, как следствие, повышение скорости струи увеличивает скорость частиц и снижает их температуру, что понижает интенсивность процесса испарения меди. Из уравнения регрессии, отражающего влияние параметров процесса на содержание меди в покрытиях, следует также, что наиболее действенным методом сохранения соотношения содержания компонентов в покрытии относительно исходного является увеличение расхода сжатого воздуха и снижение напряжения для уменьшения выгорания медной составляющей. Степень влияния параметров напыления на содержание меди в покрытии (рис. 3), представлена следующим уравнением: $\%Cu = 49,09 + 0,03W - 0,6U + 1,5V + 0,004H$. Изменение дистанции напыления в пределах 0,06...0,2 м на содержание компонентов в покрытии существенного влияния не оказывает.

Максимальное содержание оксидов обнаружено в покрытиях, напыленных на режимах с максимальным расходом сжатого воздуха и максимальной дистанцией напыления (табл. 3, опыты № 1, 7). Это связано с тем, что повышение расхода сжатого воздуха ведет к уменьшению диаметра распыляемых частиц при диспергировании проволок [6], что ведет к увеличению размера площади развития процесса окисления. Увеличение дистанции напыления ведет в свою очередь к увеличению времени пребывания частиц в струе и развитию процесса взаимодействия частиц с кислородом. Степень влияния факторов напыления на содержание оксидов в покрытиях (рис. 4) пред-

Таблица 3. Содержание компонентов, степень окисления и пористость псевдосплавных покрытий сталь-медь

Но-мер опыта	Содержание меди в покрытии, об. %	Содержание стали в покрытии, об. %	Содержание оксидов, об. %	Пористость, об. %	Содержание меди в суммарном содержании металлических составляющих, об. %
1	24	42	27	7	36
2	23	47	20	10	33
3	37	36	21	8	51
4	33	36	25	6	48
5	21	49	25	5	30
6	19	46	22	13	29
7	31	35	26	8	47
8	35	38	21	6	48

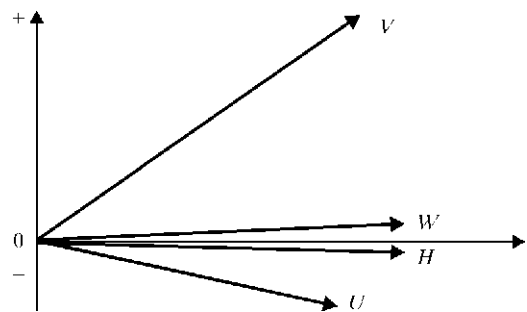


Рис. 3. Степень влияния факторов напыления на содержание меди в покрытиях

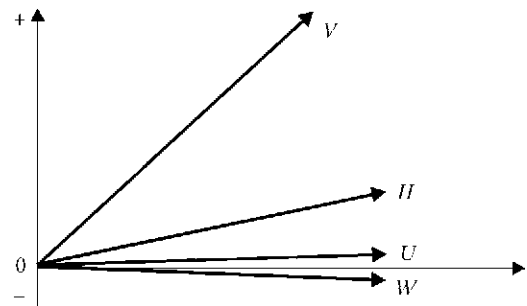


Рис. 4. Степень влияния факторов напыления на степень окисления покрытий

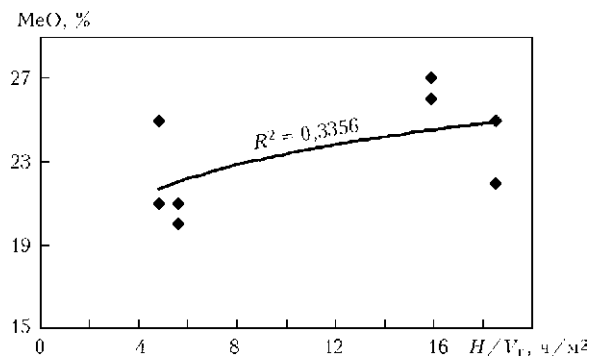


Рис. 5. Зависимость степени окисления покрытия от показателя времени пребывания частиц в струе

ставлена уравнением $\%MeO = 2,44 - 0,002W + 0,01U + 2,75V + 0,02H$.

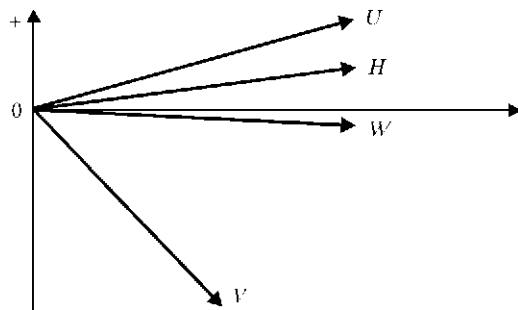


Рис. 6. Степень влияния факторов напыления на пористость покрытий

На рис. 5 представлена зависимость содержания оксидов в покрытии от показателя времени пребывания частиц в струе (H/V_r).

Результаты исследования пористости покрытий показали, что она не превышает 13 %. Как видно из уравнения регрессии, на величину пористости в первую очередь оказывает влияние расход сжатого воздуха, увеличение которого ведет к увеличению скорости полета частиц, снижению размера распыляемых капель и, следовательно, к формированию более плотного покрытия. Степень влияния факторов напыления на величину пористости покрытий (рис. 6) описывается уравнением: $\%П = 16,03 - 0,002W + 0,07U - 1,75V + 0,01H$.

На пористость покрытий оказывает также влияние отношение плотности твердого материала к плотности расплава ($\rho_{ТВ}/\rho_{Ж} = 8,93/8,03 = 1,11$ для меди и $\rho_{ТВ}/\rho_{Ж} = 7,87/7,02 = 1,12$ для железа). Так как плотность расплава материала покрытия меньше его плотности в твердом состоянии, при затвердевании расплавленных частиц их объем уменьшается, что и ведет к образованию пор.

На рис. 7 приведена гистограмма зависимости микротвердости псевдосплавного покрытия сталь-медь от режима напыления.

Замеры твердости в количестве 50 измерений проводили по всему сечению покрытия. Зависимости микротвердости от положения точек заме-

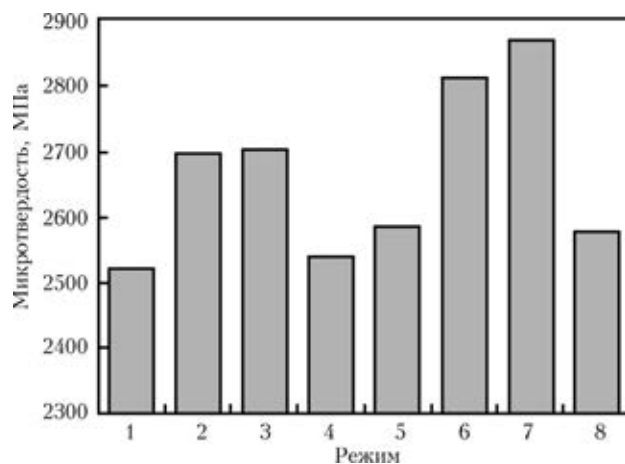


Рис. 7. Зависимость микротвердости покрытий сталь-медь от режима распыления

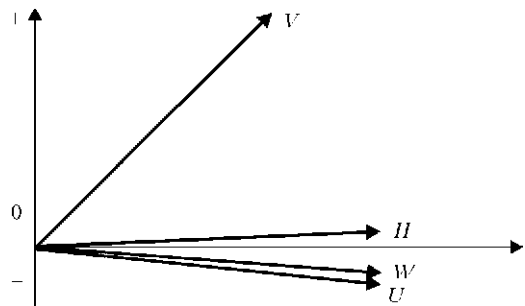


Рис. 8. Степень влияния факторов напыления на микротвердость покрытий сталь-медь

ров не обнаружено. Микротвердость покрытий, полученных при различных режимах напыления, находится в пределах 2500...2900 МПа.

Полученные уравнения регрессии, связывающие параметры напыления с твердостью покрытия, показывают, что твердость покрытия повышается с увеличением расхода сжатого воздуха и дистанцией напыления. Это вызвано ростом степени окисления составляющих покрытия при увеличении этих параметров и упрочнением материала покрытия включениями оксидов. Увеличение скорости подачи проволок и напряжения в равной степени ведет к уменьшению твердости покрытия за счет увеличения тепловложения в напыляемые материалы, что может приводить к их разупрочнению. Степень влияния факторов напыления на микротвердость покрытий сталь-медь (рис. 8) представлена уравнением регрессии: $HV = 2680 - 0,8W - 0,77U + 12V + 0,324H$.

Наилучший комплекс структуры и свойств электродуговых псевдосплавных покрытий сталь-медь по показателям сохранения соотношения компонентов (37 об. % Cu, 36 об. % Fe), пористости (8 об. %), степени окисления (21 об. %) и твердости (2700 МПа) был получен в случае напыления при тепловложении в проволоку 1,0 МДж/кг и расходе сжатого воздуха 126 м³/ч (табл. 1, опыт № 3) — т. е. при комбинации средней степени вклада энергии дуги в нагрев распыляющего газа (воздуха), ограниченной интенсивности нагрева расплава проволок и повышенной скорости продуктов распыления высокой дисперсности, что обеспечивает получение покрытий с низкой пористостью.

Выводы

1. Проведено исследование процесса напыления псевдосплавного покрытия на примере псевдосплавов сталь-медь с применением метода математического планирования эксперимента. Анализ сплетов, полученных при используемом диапазоне режимов напыления, показал, что частицы в момент соударения с основой находятся в расплавленном состоянии и характеризуются высокой скоростью (около 100 м/с). Структура покрытий имеет ла-



лярную структуру и состоит из компонентов меди и стали с оксидными включениями.

2. Установлено, что при электродуговом напылении псевдосплавных покрытий из проволок меди и стали изменение тепловложения в распыляемый материал приводит к изменению соотношения содержания медной и стальной составляющих в покрытии. При напылении с тепловложением в проволоку 1,4...2,2 МДж/кг относительное содержание меди по отношению к стали составляет около 30 об. %, а при 0,6...1,0 МДж/кг составляет около 50 об. %. Вероятными причинами снижения содержания меди являются выгорание (испарение) и окисление меди в процессе распыления ввиду ее перегрева выше точки плавления. Наиболее действенным методом снижения потерь меди для получения равномерного содержания компонентов в псевдосплавном покрытии сталь-медь является увеличение расхода сжатого воздуха до 126 м³/ч и снижение тепловложения в напыляемый материал до 0,6...1,0 МДж/кг для уменьшения выгорания медной составляющей.

3. Максимальное содержание оксидов 26...27 % обнаружено в покрытиях при напылении с расходом сжатого воздуха 126 м³/ч и дистанцией напыления 0,2 м. Это связано с увеличением дисперсности распыляемых материалов и увеличением времени взаимодействия частиц с кислородом. На величину пористости в первую очередь оказывает влияние расход сжатого воздуха, увеличение которого со 108 до 126 м³/ч ведет к снижению размера распыляемых капель и следовательно к формированию более плотного покрытия.

4. Микротвердость полученных покрытий находится в пределах 2500...2900 МПа. Полученные уравнения регрессии, связывающие параметры напыления с твердостью покрытия, показывают, что твердость покрытия повышается с увеличением расхода сжатого воздуха со 108 до 126 м³/ч и дистанции напыления с 0,06 до 0,2 м. Это вызвано ростом степени окисления составляющих покрытия.

5. Основным фактором напыления, влияющим на характеристики псевдосплавного покрытия сталь-медь, является расход сжатого воздуха, увеличение которого ведет к сохранению содержания компонентов в покрытии относительно исходного, уменьшению пористости и увеличению твердости.

1. Коробов Ю. С. Совершенствование технологии электродуговой металлизации на основе моделирования взаимодействия металла с газами и исследования свойств покрытий: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Ур. гос. техн. ун-та, 2006. — 31 с.
2. Вадивасов Д. Г. Восстановление деталей металлизацией. — Саратовское книжное изд-во, 1956. — 279 с.

3. Красниченко Л. В. Современная технология металлизации распылением. — М.: Трудрезервиздат, 1958. — 94 с.
4. Брусило Ю. В. Особенности покрытий, полученных электрометаллизацией с последующим электроконтактным припеканием // Вісник Нац. транспортного ун-ту: В 2-х ч. Ч.1. — К.: НТУ, 2009. — Вип. 19. — С. 75–82.
5. Particle size distribution in a wire-arc spraying system / A. Pourmoussa, J. Mostaghimi, A. Abedini, S. Chandra // J. of Thermal Spray Technology. — 2005. — V. 14. — P. 502–510.
6. Исследование диспергирования разнородных проволочных материалов в процессе электродугового напыления / Ю. С. Борисов, Н. В. Вигилянская, И. А. Демьянов и др. // Автомат. сварка. — 2013. — № 2. — С. 25–31.
7. Newbery A. P., Grant P. S., Neiser R. A. The velocity and temperature of steel droplets during electric arc spraying // Surface and Coatings Technology. — 2005. — Vol. 195, Issue 1. — P. 91–101.
8. Анализ методов управления параметрами напыляемых частиц при электродуговой металлизации / В. А. Агеев, В. Е. Белашенко, И. Э. Фельдман, А. В. Черноиванов // Свароч. пр-во. — 1989. — № 12. — С. 30–32.
9. Newbery A. P., Grant P. S. Large arc voltage fluctuations and droplet formation in electric arc spraying // Powder Met. — 2003. — 46, № 3. — P. 229–235.
10. 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. Bolo et al. // Surface and Coatings Technology. — 2005. — V. 200, Issue 7. — P. 2123–2130.
11. Бороненков В. Н., Коробов Ю. С. Основы дуговой металлизации. Физико-химические закономерности. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2012. — 265 с.
12. Коробов Ю. С., Бороненков В. Н. Кинетика взаимодействия напыляемого металла с кислородом при электродуговой металлизации // Свароч. пр-во. — 2003. — № 7. — С. 30–36.
13. Planche M. P., Liao H., Coddet C. Relationships between in-flight particle characteristics and coating microstructure with a twin wire arc spray process and different working conditions // Surface and Coatings Technology. — 2004. — V. 182, Issues 2-3. — P. 215–226.
14. Hussary N. A., Heberlein J. V. R. Atomization and particle-jet interactions in the wire-arc spraying process // J. of Thermal Spray Technology. — 2001. — V. 10, Issue 4. — P. 604–610.
15. Zhu Y. L., Liao H. L., Coddet C., Xu B. S. Characterization via image analysis of cross-over trajectories and inhomogeneity in twin wire arc spraying. // Surface and Coatings Technology. — 2003. — V. 162, Issues 2-3. — P. 301–308.
16. Новик Ф. С., Арсов Я. Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. — М.: Машиностроение; София: Техника, 1980. — 304 с.
17. Катц Н. В., Антошин Е. В., Вадивасов Д. Г. Металлизация распылением. — М.: Машиностроение, 1966. — 200 с.
18. Троицкий А. Ф. Основы металлизации распылением. — Ташкент: Госиздат УзССР, 1960. — 184 с.
19. Разработка измерителя скорости светящихся объектов ИССО-1: (Отчет по научно-исследовательской работе) / Ин-т физики Академии наук БССР; науч. руководитель В. Д. Шиманович; № ГР Б046721; Инв. № 1911. — Минск, 1979. — 38 с.
20. Кузнецов В. Д., Паценко В. Д. Фізико-хімічні основи створення покриттів. Навчальний посібник. — Київ: НМЦ ВО, 1999. — 179 с.
21. [http://www.masters.donntu.edu.ua/2006/fizmet/yeresko/dis/dis\(ru\).htm](http://www.masters.donntu.edu.ua/2006/fizmet/yeresko/dis/dis(ru).htm). Анализ технологии удаления меди испарением из расплавленного металла под действием электрической дуги.
22. Медь в стали и проблемы ее удаления / И. Н. Зигало, В. И. Баптизманский, Ю. Ф. Вяткин и др. // Сталь. — 1991. — № 7. — С. 18–22.

Поступила в редакцию 19.06.2013