

ЗВАРЮВАЛЬНЕ ВИРОБНИЦТВО

УДК 621.791.927

©Чигарев В.В.¹, Волков Д.А.²

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАГРЕВА ПРИСАДОЧНОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ НАПЛАВКЕ ИЗНОСОСТОЙКОГО СПЛАВА

В статье приведена математическая модель, описывающая закономерности нагрева присадочного материала – порошковой проволоки в процессе электроконтактной наплавки износостойкого сплава. Получены уравнения регрессии, позволяющие прогнозировать температуру нагрева порошковой проволоки в процессе электроконтактной наплавки.

Ключевые слова: порошковая проволока, электроконтактная наплавка, поверхность отклика.

Чигарев В. В., Волков Д. А. Математична модель нагрівання присаджувального матеріалу при електроконтактному наплавленні зносостійкого сплаву. У статті наведена математична модель, що описує закономірності нагрівання присаджувального матеріалу – порошкового дроту в процесі електроконтактного наплавлення зносостійкого сплаву. Отримані рівняння регресії, що дозволяють прогнозувати температуру нагрівання порошкового дроту в процесі електроконтактного наплавлення.

Ключові слова: порошковий дріт, електроконтактне наплавлення, поверхня відгуку.

V.V.Chigarev, D.A. Volkov. *Mathematical model of heating of a filler material at electric-resistance overlaying of wear resistant alloy. The article contains a mathematical model, describing the regularities of the overlaying metal heating. – a powder wire, deposited by means of electric-resistance surface deposition. Obtained were regression equations, which allow to predict the temperature of powder wire at electric-resistance surface deposition.*

Keywords: a powder wire, an electrocontact building-up welding, a response surface.

Постановка проблеми. Большинство методов нанесения износостойких покрытий на различные детали сельскохозяйственных машин и оборудования представляют собой энергоёмкие процессы с большим тепловложением в упрочняемое или восстанавливаемое изделие, вследствие чего неизбежны большие температурные деформации.

Этого недостатка не имеют методы восстановления, использующие тепловую энергию, выделяемую импульсным электрическим током на активном сопротивлении [1, 2]. Их характеризуют незначительные энергозатраты, малая зона термического влияния, высокая производительность, хорошие гигиенические условия труда. Основным представителем подобных технологических процессов является электроконтактная наплавка [3, 4]. Однако, температура нагрева, участвующих в процессе электроконтактной наплавки деталей, определяется многими факторами: теплофизическими, геометрическими и технологическими. Поэтому оценка влияния этих факторов на кинетику нагрева присадочного материала и приконтактного объема наплавленной детали достаточно сложная и актуальная задача.

Анализ последних исследований и публикаций. Основной отличительной особенностью электроконтактной наплавки, как порошковых, так и компактных материалов является то,

¹ д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

² ст. преподаватель, Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск

что в процессе наплавки электрический ток проходит в направлении перпендикулярном плоскости приварки единичной площадки покрытия [3, 4]. Приварка покрытия к основе происходит в основном за счет термомодеформационных процессов, проходящих в зоне контакта между присадочным материалом и поверхностью детали за счет тепла, выделяющегося на контактом сопротввлении.

Поэтому можно сделать вывод, что электроконтактная наплавка является процессом с ярко выраженным температурным активированием поверхности.

В последнее время, в качестве присадочных материалов при электроконтактной наплавке, широко применяются порошковые проволоки и ленты, которые являются слоистыми материалами, состоящими из металлической оболочки и уплотненного порошкового сердечника.

Такая конструкция присадочного материала существенно изменяет общую картину выделения тепла в зоне соединения. Так авторы работы [5] считают, что основанием для регулирования технологического процесса наплавки является распределение тепла по толщине сердечника порошковой ленты, а это в свою очередь позволяет контролировать нагрев и расплавление компонентов шихты присадочного материала.

В свою очередь в работе [6] приводятся данные о том, что при электроконтактной наплавке порошковой проволокой нагрев сердечника осуществляется не за счет протекания электрического тока, а за счет теплопроводности от оболочки к порошку. Это в свою очередь приводит к равномерному распределению тепловых потоков в многослойной наплавке, состоящей из компактных и порошковых материалов, что в свою очередь обеспечивает гарантированное выделение тепла в зоне соединения поверхностного слоя детали с оболочкой порошковой проволоки.

Поэтому разработка модели нагрева порошковой проволоки при электроконтактной наплавке позволит качественно оценить тепловые потоки, проходящие по оболочке, порошковой шихте и присадочному материалу в целом.

Цель статьи – установление основных закономерностей нагрева присадочного материала – порошковой проволоки в процессе электроконтактной наплавки износостойкого сплава, а так же создание математической модели, описывающей этот процесс.

Изложение основного материала. Для достижения, поставленной цели, а также с целью сокращения количества экспериментов использовали метод математического моделирования [7]. Моделирование осуществляли в программной среде системы Statistica (StatSoft) [8, 9].

Экспериментальная реализация планов осуществлялась путем определения температуры нагрева присадочного материала на экспериментальной установке, созданной на базе модернизированной точечной машине МТ-1222-У4. Температура измерялась с помощью хромель-алюмелевых термопар, расположенных в центре порошкового материала и в зоне контактов между оболочкой и деталью, между оболочкой и электродом. Регистрация сигнала осуществлялась шлейфовым осциллографом К12-22. За эталонное значение температуры принимали температуру плавления свинца.

Варьируемыми параметрами являлись: начальная плотность порошкового материала (P_0), а так же технологические параметры режима: ток ($I_{нан}$), усилие на электродах (P), время протекания импульса тока ($t_{и}$).

Наибольшее распространение получили эксперименты, в которых факторы варьируются на двух уровнях, т.е. эксперименты типа 2^k . Увеличение числа факторов и уровней варьирования резко увеличивает число опытов. Поэтому использовали ортогональные планы второго порядка 2^2 [7].

Построили три математические модели, описывающие влияние на температуру нагрева присадочного материала следующих пар факторов:

- тока наплавки и времени протекания импульса тока (таблица 1);
- плотности порошкового материала и времени протекания импульса тока (таблица 2);
- тока наплавки и усилия на электродах (таблица 3).

После реализации план-матрицы табл. 1 и статистической обработки данных получили следующие уравнения регрессии:

$$\frac{T}{T_{пл}} = -0,68 + 0,06 \cdot I_{нан} - 0,001 \cdot I_{нан}^2 + 12,18 \cdot t_{нан} - 103,12 \cdot t_{нан}^2 + 0,2 \cdot I_{нан} \cdot t_{нан}, \quad (1)$$

$$\frac{T}{T_{пл}} = 0,103 - 0,024 \cdot I_{нап} + 0,0016 \cdot I_{нап}^2 - 5,7 \cdot t_{им} + 48,44 \cdot t_{им}^2 + 0,33 \cdot I_{нап} \cdot t_{им} \quad (2)$$

Таблица 1

Матрица планирования эксперимента 2^2 для факторов $I_{нап}$ и $t_{им}$

Уровень	Фактор		Кодированное значение
	$I_{нап}$	$t_{им}$	
	X_1	X_2	
Нижний	12	0,02	-1
Верхний	20	0,1	+1
Нулевой	16	0,06	0
Интервал	4	0,04	

Таблица 2

Матрица планирования эксперимента 2^2 для факторов Π_0 и $t_{им}$

Уровень	Фактор		Кодированное значение
	$t_{им}$	Π_0	
	X_1	X_2	
Нижний	0,02	40	-1
Верхний	0,1	80	+1
Нулевой	0,06	60	0
Интервал	0,04	20	

Таблица 3

Матрица планирования эксперимента 2^2 для факторов $I_{нап}$ и P

Уровень	Фактор		Кодированное значение
	$I_{нап}$	P	
	X_1	X_2	
Нижний	12	1,0	-1
Верхний	20	3,0	+1
Нулевой	16	2,0	0
Интервал	4	1,0	

На рис. 1, представлены поверхности отклика, построенные по уравнениям (1) и (2), представляющие собой зависимости температуры оболочки – а) и порошкового материала – б) от силы тока и длительности его протекания.

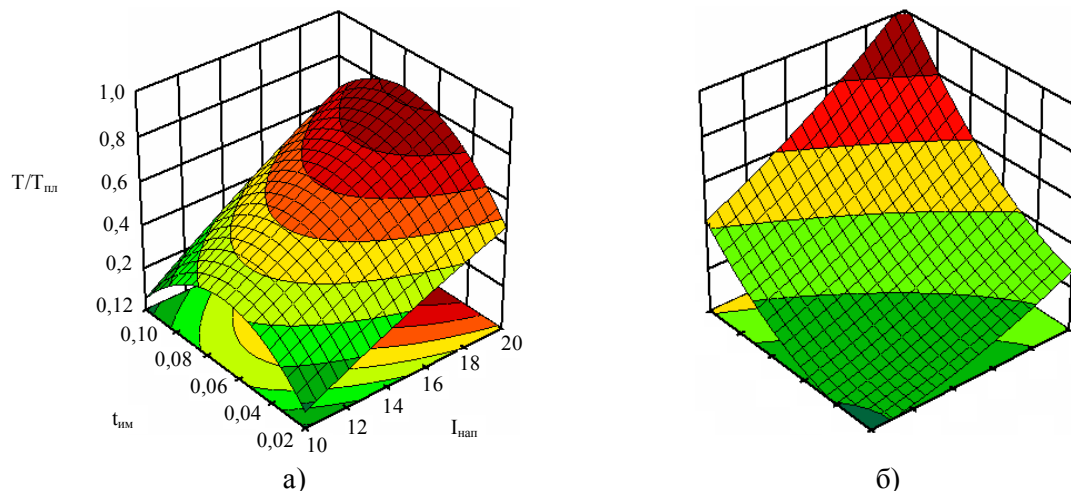


Рис. 1 – Поверхность отклика температуры нагрева присадочного материала от параметров режима наплавки: а – оболочка; б – порошковая шихта.

Из анализа зависимостей рис. 1, а видно, что за время 0,06...0,08 сек. температура оболочки достигает своего максимума, затем, несмотря на продолжающееся протекание электри-

ческого тока, температура оболочки заметно падает.

Это связано с перемещением зоны тепловыделения. В начальный момент тепло выделяется в зоне контакта оболочки и детали, за счет этого тепла происходит нагрев оболочки до максимальной температуры. Одновременно с этим происходит нагрев и деформация всего присадочного материала, что приводит к резкому увеличению площади контакта между оболочкой и деталью и исчезновению контактного сопротивления. При этом снижается плотность тока в контакте и увеличивается теплоотвод в наплавляемую деталь. Все эти процессы обуславливают уменьшение температуры оболочки на втором этапе электроконтактной наплавки порошковой проволокой.

Кривые изменения температуры порошкового материала (рис. 1, б), заключенного в металлическую оболочку также хорошо согласуются с данными об электросопротивлении порошка и оболочки. На первом этапе температура порошка увеличивается медленно, так как нагрев в основном происходит за счет теплоотвода от оболочки. После деформации присадочного материала, когда электрический ток начинает протекать непосредственно через порошковый слой температура порошка резко возрастает за счет тепловыделения в контактах между частицами порошкового материала. Причем температура нагрева порошка может превышать температуру оболочки. После исчезновения контактных электросопротивлений в порошковом слое, вследствие продолжающейся деформации присадочного материала и окончательного уплотнения порошка, тепло, выделяемое за единицу времени, становится меньше тепла, отводимого в массу детали. Температура порошка начинает уменьшаться. Следовательно, можно сделать вывод, что увеличение времени протекания электрического тока выше определенного предела не приводит к дальнейшему повышению температуры присадочного материала.

Приведенные зависимости показывают, что в начальный момент времени основным источником тепловыделения являются контактные электросопротивления между оболочкой, деталью и электродом. Температура порошкового материала на первом этапе значительно ниже. На втором этапе после деформации присадочного материала тепло выделяется в порошковом слое, его температура становится выше температуры оболочки. Необходимо учитывать этот момент при выборе режима наплавки, так как увеличение тока выше критического в данном случае может привести к расплавлению порошка, прожогу оболочки и выплеску расплавленного металла в виде капель.

Авторы работы [4] отмечают, что температура нагрева зависит в значительной мере от пористости порошка и от усилия на электроде.

После реализации план-матрицы табл. 2 и статистической обработки данных получили следующее уравнение регрессии:

$$\frac{T}{T_{пл}} = -0,316 + 10,147 \cdot t_{им} - 64,063 \cdot t_{им}^2 + 0,0007 \cdot P_0 + 0,0001 \cdot P_0^2 + 0,0262 \cdot t_{им} \cdot P_0 \quad (3)$$

На рис. 2 представлена поверхность отклика, построенная по уравнению (3) и представляющая собой зависимость температуры нагрева порошкового материала от начальной плотности порошка и времени протекания импульса электрического тока.

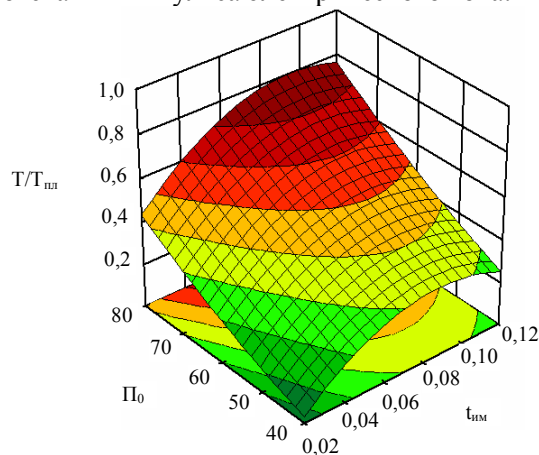


Рис. 2 – Поверхность отклика температуры нагрева присадочного материала от времени импульса тока и начальной плотности порошка в оболочке

Анализ полученных данных показывает, что при увеличении начальной плотности порошка максимальная температура его нагрева тоже увеличивается. Как было показано ранее, подобное явление связано с увеличением площади контакта между оболочкой и деталью при уменьшении начальной плотности порошкового материала. Следствием этого является снижение плотности электрического тока и температуры нагрева. Причем и в данном случае показано, что увеличение времени протекания электрического тока в указанных пределах не приводит к увеличению температуры нагрева порошка в оболочке.

После реализации план-матрицы табл. 3 и статистической обработки данных получили следующие уравнения регрессии:

$$\frac{T}{T_{нл}} = -0,3337 + 0,0253 \cdot I_{нап} + 0,0113 \cdot I_{нап}^2 + 0,23 \cdot P - 0,0594 \cdot P^2, \quad (4)$$

$$\frac{T}{T_{нл}} = -0,31 + 0,021 \cdot I_{нап} + 0,0003 \cdot I_{нап}^2 + 0,21 \cdot P - 0,03 \cdot P^2 - 0,006 \cdot I_{нап} \cdot P. \quad (5)$$

На рис. 3, а и б показаны поверхности отклика, построенные по уравнениям (4) и (5) и представляющие собой зависимость температуры нагрева порошковой проволоки от тока наплавки и усилия на электродах.

Данные кривые, подтверждают, выше указанные, положения и выявляют совместное влияние начальной пористости порошкового материала и усилия на электроде на максимальную температуру нагрева порошка.

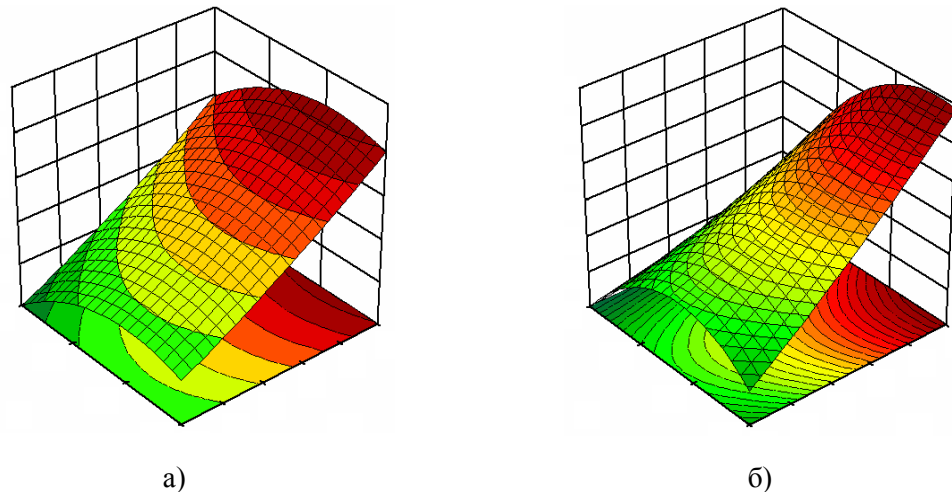


Рис. 3 – Поверхность отклика температуры нагрева порошковой проволоки от усилия на электродах и тока наплавки: а – начальная плотность порошка $\Pi_0=80\%$; б – начальная плотность порошка $\Pi_0=40\%$.

Хорошо видно, что с уменьшением начальной плотности порошкового материала в оболочке и с увеличением усилия на электроде влияние величины электрического тока на температуру нагрева присадочного материала уменьшается. Если при начальной плотности $\Pi_0=80\%$ (рис. 3, а) увеличение тока с 10 кА до 16 кА приводит к заметному увеличению температуры нагрева, то при $\Pi_0=40\%$ и усилии на электроде 4 кН (рис. 3, б) сила тока не оказывает практически никакого влияния на температуру нагрева присадочного материала.

Это объясняется тем, что в этом случае площадь контакта между оболочкой и деталью настолько велика, что практически все тепло, выделяемое в присадочном материале при прохождении через него электрического тока, отводится в деталь и электрод контактной сварочной машины.

Подобное явление происходит при контактной сварке заготовки малой толщины с массивной деталью [3]. Зона нагрева смещается в массивную деталь и сварка без применения дополнительных технологических приемов невозможна.

Таким образом, определяющее влияние усилия на электроде и пористости порошка на температуру нагрева характерно только для способа электроконтактной наплавки порошковой

проволокой. При наплавке порошка в свободном состоянии (без оболочки), он распределен равномерно по ширине зоны нагрева и деформация при увеличении усилия на электродах в известных пределах не приводит к увеличению площади контакта и снижению температуры нагрева [4].

При наплавке сплошной проволокой, последняя в холодном состоянии практически не деформируется [3], следовательно, площадь контакта между присадочным материалом и деталью практически не увеличивается.

Выводы

1. Были установлены основные закономерности нагрева присадочного материала – порошковой проволоки в процессе электроконтактной наплавки износостойкого сплава.
2. Доказано, что наличие высокой начальной пористости порошковой шихты в оболочке приводит к появлению предварительной холодной деформации присадочного материала при увеличении усилия на электроде. Появляется возможность регулировать величину площади контакта между оболочкой и деталью, а следовательно и электрическое контактное сопротивление, плотность электрического тока, и как следствие, температуру нагрева всего присадочного материала.
3. Получены уравнения регрессии, описывающие процесс нагрева порошковой проволоки в процессе электроконтактной наплавки.

Список использованных источников:

1. Bräuer A. Einzelteilinstandsetzung durch Widerstandsrollnahtbeschichten / A. Bräuer // Agrartechnik (DDR). – 1989. – №2. – P. 88–89.
2. Lüdorff H. Dünne verschleißfeste Schichten. Rollennaht-Auftragschweißen als Problemlösung in der Hüttentechnik / H. Lüdorff, S. Müller, G. Sitte // Metalloberfläche. – 1991. – №12. – P. 547–550.
3. Клименко Ю. В. Электроконтактная наплавка / Ю.В. Клименко. – М. : Металлургия, 1978. – 128 с.
4. Ярошевич В. К. Электроконтактное упрочнение / В. К. Ярошевич, Я. С. Генкин, В. А. Верещагин. – Минск : Наука и техника, 1982. – 256 с.
5. Чигарев В. В. Математическое моделирование теплового состояния сердечника порошковой ленты при восстановительной электроконтактной наплавке / В. В. Чигарев, Е. В. Кассова // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: Зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2009. – № 1(15). – С. 338-341.
6. Волков Д. А. Особенности нагрева присадочного материала при электроконтактной наплавке порошковой проволокой / Д. А. Волков, В. А. Пресняков, // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: Зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2011. – №1 (22). – С. 34-39.
7. Винарский М. С. Планирование эксперимента в технологических исследованиях / М. С. Винарский, М. В. Лурье. – Киев : Техника, 1975. – 167 с.
8. Зарубин В. С. Математическое моделирование в технике: Учеб. для вузов / Под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 496 с.
9. Боровиков В. П. STATISTICA: искусство анализа данных на компьютере. Для профессионалов./ В.П. Боровиков. – СПб. : Питер, 2001. – 656 с.
нумерация с 1 –по 9

Bibliography:

1. Bräuer A. Einzelteilinstandsetzung durch Widerstandsrollnahtbeschichten / A. Bräuer // Agrartechnik (DDR). – 1989. – №2. – P. 88–89.
2. Lüdorff H. Dünne verschleißfeste Schichten. Rollennaht-Auftragschweißen als Problemlösung in der Hüttentechnik / H. Lüdorff, S. Müller, G. Sitte // Metalloberfläche. – 1991. – №12. – P. 547–550.
3. Klimenko Yu. V. Electrocontact surfacing / Yu. V. Klimenko. – M.: Metallurgiya, 1978. – 128 p. (Rus.)
4. Yaroshevich V.K. Electrocontact strengthening / V.K. Yaroshevich, Ya. S. Genkin, V.A. Vereshyagin. – Minsk: Nauka i tehnika, 1982. – 256 p. (Rus.)
5. Chigarev V. V. Mathematical design of the thermal state of mandrel of powder-like ribbon at restoration electrocontact surfacing / V.V. Chigarev, E.V. Kassova // Visnik Donbaskoi derzhavnoi mashi-

- nobudivnoi akademii: Collection of science papers. – Kramatorsk: DSEA, 2009. – № 1(15). – P. 338-341. (Rus.)
6. Volkiov D.A. Features of heating of adding material at electrocontact surfacing by powder wire / D.A. Volkiov, V.A. Presnyakov, // Visnik Donbaskoi derzhavnoi mashinobudivnoi akademii: Collection of science papers. – Kramatorsk: DSEA, 2011. – № 1(22). – P. 34-39. (Rus.)
7. Vinarskii M.S. Planning of experiment is in technological of research / M.S. Vinarskii, M.V. Lur'e. – Kiev: Tehnika, 1975. – 167 p. (Rus.)
8. Zarubin V. S. Mathematical design in technician: Text-book for institute of higher education / pod red. V.S. Zarubin, A.P. Krishenko. – M.: MSTU im. N. E. Bauman, 2001. – 496 p. (Rus.)
9. Borovikov V.P. STATISTICA: art of analysis of data on a computer. For professionals / V.P. Borovikov. – SPb.: Piter, 2001. – 656 p. (Rus.)

Рецензент: С.В. Гулаков
д-р техн. наук, проф. ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 12.09.2011

УДК 621.791.075.8

©Зусин В.Я.*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕНОСА ЭЛЕКТРОДНОГО МЕТАЛЛА ПРИ НАПЛАВКЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ

Рассмотрен характер переноса электродного металла при наплавке алюминиевых сплавов порошковой проволокой. Показаны особенности переноса в зависимости от режима наплавки. Предложен оптимальный режим импульсно-дуговой наплавки, обеспечивающий стабильность процесса, хорошее формирование наплавленного металла с высокими эксплуатационными характеристиками.

Ключевые слова: порошковая проволока, наплавка, алюминиевые сплавы, импульсный режим.

Зусін В.Я. Дослідження перенесення електродного металу при наплавленні алюмінієвих сплавів порошковим дротом. Розглянуто характер перенесення електродного металу при наплавленні алюмінієвих сплавів порошковим дротом. Показано особливості перенесення залежно від режиму наплавлення. Запропоновано оптимальний режим імпульсно-дугового наплавлення, який забезпечує стабільність процесу, якісне формування наплавленого металу з високими експлуатаційними характеристиками.

Ключові слова: порошковий дріт, наплавлення, алюмінієві сплави, імпульсний режим.

V.Y. Zusin. Investigation of electrode metal transfer at surface deposition of aluminium alloys with powder wire. In the article the character of electrode metal transfer at surface deposition of aluminium alloys with powder wire was investigated. Shown were the peculiarities of the transfer depending upon the deposition mode. An optimal mode of impulse-arc deposition was proposed, ensuring stability of the process and good formation of the deposited metal with high exploitation characteristics.

Keywords: powder wire, surface deposition, aluminium alloys, impulse-arc mode.

Постановка проблеми. Широкие возможности в легировании металла при наплавке деталей из алюминиевых сплавов дает использование порошковой проволоки с алюминиевой оболочкой. Однако наличие тугоплавкой оксидной пленки на поверхности электродного мате-

* д-р техн. наук, проф. ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь