

ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЙ НАПЛАВКИ МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫХ Al-SiC КОМПОЗИТОВ

ELECTROTHERMAL WELDING TECHNOLOGY OF Al-SiC METAL MATRIX COMPOSITES

Сосновский И.А., Белоцерковский М.А., Куриленок А.А.

(Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, РБ)

Белявин К.Е. (БНТУ, г. Минск, РБ)

Кузнечик О.О., Голодок Р.П.

(Институт порошковой металлургии, г. Минск, РБ)

Sosnovsky I.A., Belotserkovsky M.A., Kurileonok A.A.

(Joint Institute Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, BY)

Belyavin K.E. (Belarusian National Technical University, Minsk, BY)

Kuznechik O.O., Golodok R.P.

(Powder Metallurgy Institute, Minsk, BY)

Приведено описание процессов индукционной и электроконтактной наплавки на стальную основу порошковой шихты металломатричного Al-SiC композита. Показана роль в этих процессах флюса на основе криолита и буры.

The description of the processes of induction and spark plasma welding coating of Al-SiC metal matrix composites on a steel base are presented. The role of a flux based on cryolite and borax in these processes is shown.

Ключевые слова: металломатричный композит, индукционная и электроконтактная наплавка, окислительно-восстановительный процесс

Key words: metal matrix composite, induction and electrocontact welding, redox process

Введение. Увеличение прочности, надежности и долговечности деталей механизмов и узлов трения, подвергающихся при эксплуатации повышенному воздействию тепловых и механических нагрузок, является актуальной проблемой современного машиностроения [1]. Эта проблема может решаться использованием при изготовлении таких деталей разнородных по составу и структуре композитных материалов [2], имеющих металлическую основу с нанесенными металломатричными покрытиями, которые, при правильном сочетании составных элементов, обладают такими взаимоисключающими свойствами, как относительно высокая твердость, жесткость, прочность и, одновременно с этим, относительно высокая теплопроводность и вязкость. Таким уникальным сочетанием свойств могут обладать, например, композитные материалы, состоящие из стальной основы и покрытий, представленных металломатричными композитами на основе медных и алюминиевых сплавов, упороченных твердыми включениями в виде некогерентных и малодеформируемых по отношению к металлической матрице частиц, представляющих собой, как правило, тугоплавкие оксиды и карбиды. К их числу могут относиться композитные материалы, в которых основа стальная, а покрытия представлены, например, металломатричным Al-SiC композитом. Учитывая энергоэффективность [3] существующих процессов наплавки, при получении покры-

тий из металломатричного Al-Si композита, целесообразно использовать технологию электротермической наплавки. К ней, относятся процессы индукционной и электроконтактной наплавки. Целесообразность применения этих технологий наплавки также вытекает из достаточно широкого применения в машиностроении установок индукционного нагрева токами высокой частоты (10–100 кГц) мощностью свыше 10 кВт, а также машин контактной сварки с токами промышленной частоты (50–60 Гц) свыше 10 кА и усилием сжатия электродов более 1 кН (< 100 даН). Исходя из этого, целью работы является создание основанной на процессах индукционного и электроконтактного нагрева технологии электротермической наплавки на стальную основу металломатричного Al-SiC композита.

1. Технология электротермической (индукционной и электроконтактной) наплавки покрытий. Известно [3,4], что технология электротермической наплавки, основанная на индукционном центробежном и электроконтактном способах нагрева, достаточно широко используется, технологические схемы приведены на рисунке 1. Кроме создаваемого центробежными силами или усилием сжатия электродов на порошковый материал также действует электрический ток, который либо индуцируется высокочастотным магнитным, либо переменным электрическим полями.

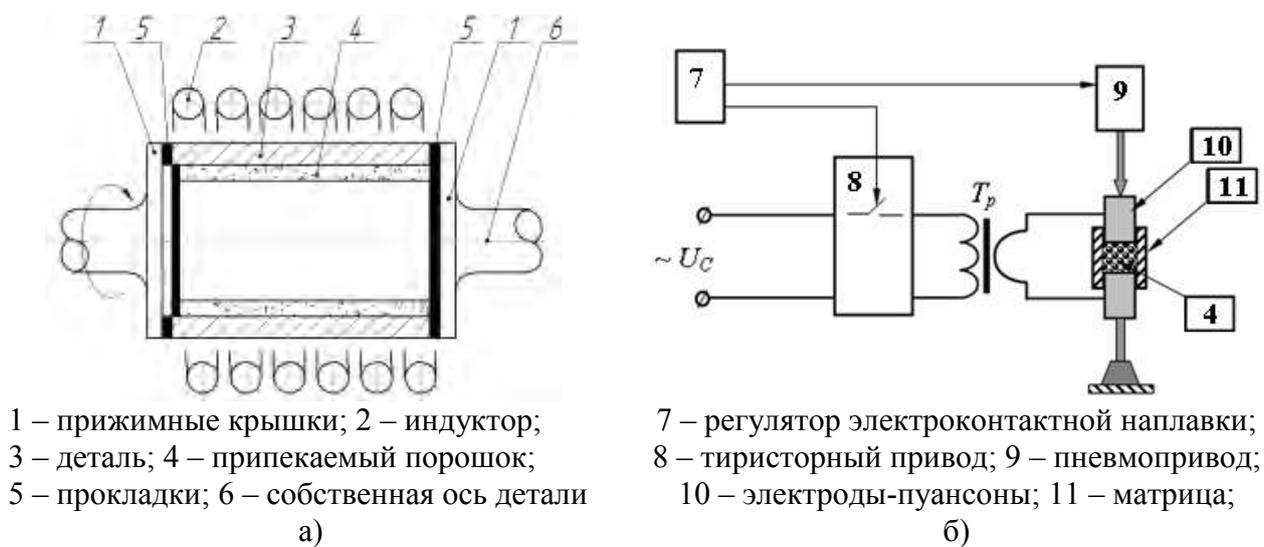


Рисунок 1 – Схемы индукционного (а) и электроконтактного (б) нагрева

Для оценки возникающих в порошковом слое механических радиальных (σ_r) или осевых (σ_z) напряжений, обусловленных действием сил (F) сжатия, а также оценки создаваемых электрическим током температурных полей в подложке и порошковом материале, можно использовать [3,4] следующие модельные допущения:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_z}{r} + \frac{F}{V_{nm}} = 0; \quad (1)$$

$$\sigma_r(T) = \left[\psi v + 2\eta(T, \Pi) \frac{\partial v_r}{\partial r} \right]; \quad (2)$$

$$\sigma_z(T) = \psi v + 2\eta(T, \Pi) \frac{v_z}{z}; \quad (3)$$

$$\Phi_{эм} = \xi \dot{I} \dot{U} = \int_V w dV; \quad (4)$$

$$\frac{\partial T_1(r, z, t)}{\partial t} = a_1 \left[\frac{\partial^2 T_1(r, z, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1(r, z, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_1(r, z, t)}{\partial z^2} \right] + \frac{w_1(r, z, t)}{c\gamma_1}, \quad (5)$$

$r \in [r_2, r_1]; z \in [0, L];$

$$\frac{\partial T_2(r, z, t)}{\partial t} = a_2(\Pi) \left[\frac{\partial^2 T_2(r, z, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2(r, z, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_2(r, z, t)}{\partial z^2} \right] + \frac{w_2(r, z, t)}{c(\Pi)\gamma_2(\Pi)}, \quad (6)$$

где V_{nm} – объем порошкового материала;

T – температура;

Π – пористость;

ψ – вязкий аналог параметра Ламе;

v – скорость уплотнения;

η – коэффициент сдвиговой вязкости;

$\Phi_{эм}$ – создаваемый электрическим и магнитным полями тепловой поток;

I, U – действующие в индукторе сила и напряжение электрического тока;

ξ – коэффициент полезного действия;

w – плотность генерируемой энергии;

$a_1, a_2(\Pi)$ – коэффициенты теплопроводности стали и порошкового слоя;

$\gamma_1, \gamma_2(\Pi)$ – плотности стальной основы и порошкового слоя.

Если известен материал частиц порошка и задана начальная пористость порошкового материала, то представленные в выражениях (2), (3) и (5), (6) физико-механические и термодинамические параметры, как функциональные, могут определяться известным образом:

$$2\eta(\Pi) = -\frac{4}{3} \cdot \frac{1-\Pi}{\Pi} \eta_m; \quad (7)$$

$$\gamma_2(\Pi) = (1-\Pi)\gamma_m; \quad \lambda_2(\Pi) = (1-\Pi)^k \lambda_m; \quad a_2(\Pi) = (1-\Pi)^q a_m; \quad c_2(\Pi) = (1-\Pi)^n c_m. \quad (8)$$

Граничные условия для выражения (5), (6) могут устанавливаться на основе ниже устанавливаемого равенства между тепловым и температурным потоками:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(r, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=0} = \alpha_1 [T_1(r, 0, t) - T_C(r, 0, t)]; \quad (9)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(r, z, t)}{\partial r} \Big|_{r=r_1} = \alpha_1 [T_1(r_1, z, t) - T_C(r_1, z, t)]; \quad (10)$$

$$\lambda_2(\Pi) \frac{\partial T_2(r, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=0} = \alpha_2(\Pi) [T_2(r, 0, t) - T_C(r, 0, t)]; \quad (11)$$

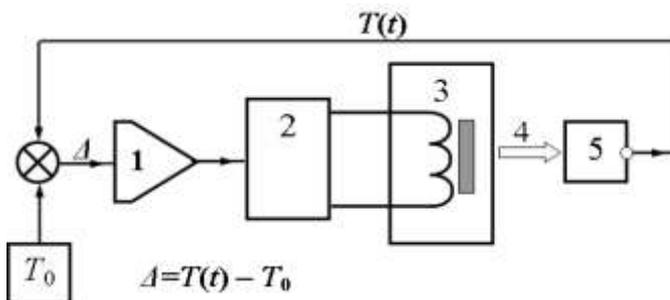
$$\lambda_2(\Pi) \frac{\partial T_2(r, z, t)}{\partial z} \Big|_{r=r_2} = \alpha_2(\Pi) [T_2(r_2, z, t) - T_C(r_2, z, t)]. \quad (12)$$

Тогда условия сопряжения температур на границе раздела двух можно оценить, исходя из представлений:

$$\lambda_2(\Pi) \frac{\partial T_2(r, z, t)}{\partial r} \Big|_{r=r_2} = \lambda_1 \frac{\partial T_1(r, z, t)}{\partial r} \Big|_{r=r_2} ; \quad (13)$$

$$T_1(r, z, t) \Big|_{r=r_2} = T_2(r, z, t) \Big|_{r=r_2} . \quad (14)$$

Если представленную в виде выражений (1)–(6) математическую модель использовать для расчета эталонных значений температуры T_{0i} на малых промежутках времени, при которых выполняются условия (9)–(14), тогда, параметрическая стабилизация режимов индукционной и электроконтактной наплавки порошковых слоев, может [4] достигаться с помощью системы адаптивного управления, схема которой приведена на рисунке 2.



- 1 – регулятор; 2 – источник тока;
 3 – электропривод установок индукционного и электроконтактного нагрева;
 4 – температурное излучение; 5 – пирометр

Рисунок 2 – Схема адаптивного управления индукционной наплавкой

Приведенные зависимости (1)–(14) в вышеизложенной технологии электротермической наплавки позволяют рассчитывать необходимые режимы ее проведения, в том числе с помощью индукционной центробежной такой наплавки, а приведенная схема адаптивного управления – для параметрической стабилизации этих режимов.

2. Выбор состава порошков и подготовка шихты для электротермической наплавки металломатричных Al-SiC композитов. При выборе состава порошков наплавочной шихты, кроме требуемой прочности, твердости и других, например, триботехнических свойств получаемых покрытий, необходимо также учитывать условия проведения электротермической наплавки и возникающую при этом прочность сцепления наплавленного металломатричного композита со стальной основой, возможность появления в металлической матрице композита интерметаллидов, не вызывающих разупрочнение. Ограничивает выбор состава порошков наплавочной шихты система металломатричного композита, в рамках которой необходимо получить покрытия требуемой прочности и твердости, включая другие, например, триботехнические свойства. Для металломатричных Al-SiC композитов данное ограничение будет выражаться в том, что в состав наплавочной шихты должны входить порошки алюминиевых сплавов и карбида кремния, которые и составят ее основу. В качестве первых, например, могут использоваться порошки, выпускаемые объединенной компанией «РУСАЛ», марок АСП, АСД, ПА, АПЖ и ПАВЧ, включая АПВ, а в качестве вторых – например, порошки ПАО «ЗАПАРОЖАБРАЗИВ» и ОАО «Волжский абразивный завод» марок ПА и

ККЧ. При подготовке основы шихты, рекомендуется использовать механическое смешивание с использованием механоактивации, которую можно осуществлять, например, в барабанных мельницах типа АГО-У2 или МПФ-1, в среде аргона, препятствующему, в первую очередь, возгоранию тонкодисперсных частиц порошков алюминия.

При выборе составов и количественного соотношения исходных порошков основы наплавочной шихты для получения антифрикционных покрытий, необходимо учитывать, что металлическая матрица в таких покрытиях должна обладать не только повышенной теплопроводностью, но и определенной пластичностью, обеспечивающей хорошую прирабатываемость контактирующих поверхностей, а твердые включения – способствовать повышению их износостойкости и понижению коэффициента трения. При таком выборе также необходимо обращать внимание на то, чтобы наплавленные покрытия имели твердость, не приводящую к истиранию материала одной из поверхностей взаимодействующих контактных пар трения.

При проведении электротермической наплавки с использованием технологического оборудования на основе закалочных установок ТВЧ, выпускаемых, например, ООО «Промышленное индукционное оборудование» или ООО «ЭЛЕСИТ», или машин контактной (точечной или шовной) сварки, выпускаемых, например, ООО «ПФ Контактная сварка», типов МТ2024Л или МШ2003Л, в зоне наплавки необходимо создавать защитную атмосферу. Такая атмосфера при наплавке может создаваться за счет введения в состав основной шихты порошков, выполняющих функции флюса. В их качестве может использоваться бура (ГОСТ 2429) с обязательным включением в ее состав, применяемого при алюминиевой сварке синтетического криолита (ГОСТ 10561), а также фтористого натрия (ГОСТ 4463) и хлористого калия (ГОСТ 4234). Получаемый путем механического перемешивания такой порошковой смеси флюс при электротермической наплавке способствует химическому растворению оксидной пленки не только у железа, но и алюминия, причем растворению оксидной пленки алюминия в жидкофазной среде фтористого натрия и хлористого калия щелочных металлов способствует присутствие синтетического криолита. Происходит это следующим образом.

Во время нагрева частиц порошка алюминиевых сплавов благодаря различным коэффициентам теплового расширения оксида алюминия пленки и алюминия, в оксидной пленке образуются микротрещины. В образующиеся трещины вливается расплавленный флюс, который в своем составе имеет хлориды. Это приводит к химическому взаимодействию, в результате которого образуется легко возгораемые ($T=183\text{ }^{\circ}\text{C}$) соединения хлорида алюминия (AlCl_3). При возгорании эти хлориды способствуют дальнейшему разрушению имеющейся вблизи протекания химической реакции оксидной пленки на поверхности алюминия и, тем самым, облегчая к нему доступ флюсов.

Если электротермическая наплавка металломатричных композитов Al-SiC композитов протекает в течение нескольких минут за счет использования процесса индукционного нагрева в поле центробежных сил, то для ограничения попадания в зону формирования покрытий воздуха, в состав наплавочной

шихты также может вводиться оксид бора, а для улучшения адгезионной прочности со сталью – вводить нашатырь.

При выборе температурных режимов электротермической наплавки металлматричных Al-SiC композитов на стальную основу необходимо учитывать, что при температурах ниже 655 °С железо практически не растворяется в жидкофазном алюминии, а при температурах плавления криолита (1012 °С) в присутствие хлоридов щелочных металлов возникает вероятность частичного разложения карбида кремния. При этом могут образовываться хрупкие фазы, приводящие к разупрочнению металлической матрицы покрытия. Следует обратить внимание на тот факт, что рекомендуемые составы порошков для получения флюсов, при определенном соотношении, способствуют образованию жидкой фазы у криолита при температурах, начиная с 665 °С.

Выводы. На основе вышеприведенного материала можно сделать следующие выводы.

1. Создана технология электротермической наплавки на стальную основу металлматричного Al-SiC композита. Данная технология включает расчет для определения границ температурных режимов индукционного и электроконтактного нагревов, обеспечивающих получение антифрикционных и износостойких покрытий из наплавочной шихты, а так же рекомендации по выбору составов исходных порошков для ее приготовления.

2. В созданной технологии, в разделе выбора состава порошков и подготовки шихты для электротермической наплавки металлматричных Al-SiC композитов, представлен механизм разрушения окисных пленок на поверхности алюминия при электротермической наплавке с помощью флюса на основе криолита и буры.

Список использованных источников

1. Современная трибология: Итоги и перспективы [Текст] / под ред. К.В. Фролова. – М.: Издательство ЛКИ, 2008. – 480 с.
2. Курганова, Ю.А. Конструкционные металлматричные композиты [Текст] / Ю.А. Курганова, А.Г. Колмаков. – М.: МГТУ им.Н.Э. Баумана, 2015. – 141 с.
3. Белявин, К.Е. Индукционный нагрев в процессах центробежного нанесения покрытий [Текст] /К.Е. Белявин, И.А. Сосновский, А.Л. Худолей. – Минск: //Вестник фонда фундаментальных исследований, 2013. – № 3(36) – С. 70–87.
4. Белявин К.Е. Импульсные электрофизические технологии получения покрытий и модифицирования поверхности материалов [Текст] /К.Е. Белявин, Д.В. Минько, О.О. Кузнецик, В.В. Макеев //Металлургия. Респ. межвед. сб. науч. трудов. – Вып. 34. ч. 2. – 2013 – С. 58–71.