

*Г. Н. Соколов – д-р техн. наук, Г. В. Рябчук – асп.*

## **ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ НАПЛАВЛЕННОГО ЭШН МЕТАЛЛА ДЛЯ РАБОТЫ В УСЛОВИЯХ ТЕРМОСИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

**Волгоградский государственный технический университет (e-mail:[weld@vstu.ru](mailto:weld@vstu.ru))**

Сформулированы требования к наплавленному металлу для работы в условия термосилового воздействия. Раскрыта роль диффузионного, структурного и технологического факторов в формировании эксплуатационных свойств износостойких сплавов.

Requirements to weld deposited to metal for work in conditions of thermopower influence are formulated. The role of diffusion, structural and technological factors in formation of operational properties of wearproof alloys is opened.

*Ключевые слова: композиционная структура, наплавленный металл, математическая модель, электрошлаковая наплавка, циркуляционные кривые, межфазная поверхность, направленная кристаллизация.*

Развитие многих отраслей промышленности, особенно машиностроения и металлургии, в которых задействованы процессы горячего деформирования сплавов, напрямую связано с

внедрением новых материалов и технологий наплавки, обеспечивающих повышение ресурса штампов и металлургического инструмента, подверженного термосиловому воздействию при рабочих температурах до 1200 °С.

Известно [1], что для упрочнения инструмента, работающего при высоких температурах без ударных нагрузок, выгодно применять композиционные наплавочные сплавы. Условно их можно разделить на материалы, имеющие структуру искусственного композита, в которой упрочняющими фазами служат принудительно внедренные в сварочную ванну тугоплавкие частицы литых карбидов, боридов и нитридов [2], и сплавы, структура естественного композита которых формируется в условиях высокоградиентной направленной кристаллизации. В последнем случае расположенные в металле нормально к плоскому фронту кристаллизации первичные дендриты выполняют функцию жаропрочной матрицы композита, а твердые эвтектические фазы и монокарбиды тугоплавких металлов образуют в нем прочный каркас, что обеспечивает повышенное сопротивление материала высокотемпературной деформации. Подобный тип структуры композиционных сплавов, более предпочтительный для рассматриваемых условий работы, может быть получен электрошлаковой наплавкой. Однако на сегодняшний день пока еще не сформулирован подход к целенаправленному формированию методом ЭШН металла со структурой естественного композита.

Цель настоящей работы состоит в выявлении основных принципов формирования композиционной структуры наплавленного ЭШН металла.

Расчетным и экспериментальными методами установлено, что термосиловое воздействие приводит к значительному увеличению скорости диффузии легирующих элементов в приконтактном слое наплавленного металла, вызывая его гомогенизацию и обуславливая снижение износостойкости. Время гомогенизации металла можно увеличить двумя способами: первый – предусматривает создание определенной степени структурной и химической неоднородности в металле, а второй – сводится к уменьшению диффузионной подвижности атомов в матрице сплава и в упрочняющих фазах.

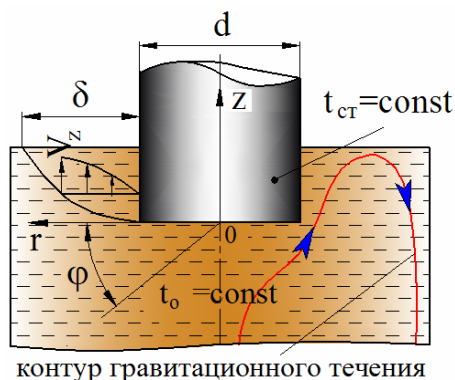
Таким образом, формирование композиционной структуры наплавочных сплавов для работы в условиях термосилового нагружения следует осуществлять с учетом диффузионного, структурного, а также и технологического фак-

торов на базе следующих принципов: в наплавленном металле необходимо выявить оптимальное соотношение атомных содержаний карбидообразующих элементов и углерода, обуславливающих формирование прочного каркаса карбидной эвтектики и стойких к растворению при высоких температурах моно- и сложных карбидов; в диапазоне рабочих температур в матрице наплавленного металла должна быть понижена диффузионная подвижность атомов основного и легирующих элементов, зависящая от типа ее кристаллической решетки, а также от количества, морфологии, распределения и типа мелкодисперсных упрочняющих фаз; для обеспечения стойкости наплавленного металла к образованию горячих трещин и трещин термической усталости в нем должно быть установлено оптимальное соотношение содержаний раздробленной и не образующей замкнутых цепочек вокруг первичных дендритов карбидной эвтектики и матричного сплава; технологический процесс наплавки должен обеспечивать минимальный прогиб межфазной поверхности шлак (газ)-металл для формирования плоского фронта кристаллизации в сварочной ванне и получения направленного расположения первичных дендритов.

Широко известно, что в процессах электрошлаковой сварки и наплавки негативное влияние технологического фактора проявляется в искажении формы фронта кристаллизации, обуславливающего снижение качества наплавленного металла. Плоский фронт кристаллизации, при котором обеспечивается направленное расположение дендритов, можно получить способом ЭШН в токоподводящем кристаллизаторе с использованием двухконтурной схемы электропитания постоянным током [2].

В математической модели электрошлакового процесса рассматривали циркуляционное течение эмульсии в токоподводящем кристаллизаторе. Для определения скорости вызванного тепловой конвекцией циркуляционного течения эмульсии рассмотрим следующую задачу. Пусть по оси цилиндрического сосуда диаметром  $D$ , заполненного эмульсией, расположен цилиндрический стержень диаметром  $d$ , причем  $d$  намного меньше  $D$ , а температура поверхности стержня  $t_{ст} = \text{const}$  больше температуры стенки цилиндра (см. рисунок).

Эмульсия вдали от цилиндрического стержня неподвижна (гравитационное течение отсутствует), температура ее вдали от цилиндриче-



контур гравитационного течения

Схема к определению скорости течения эмульсии в цилиндрической системе координат

ского стержня постоянна и равна  $t_0$ . По условию задачи  $t_{cm}$  больше  $t_0$ . Объем эмульсии настолько велик, что свободное гравитационное течение, возникающее у других тел, расположенных в этом объеме, не сказывается на течении вблизи цилиндрического стержня, которое обусловлено тепловой конвекцией и действием электромагнитных сил.

Для упрощения решения задачи примем следующие допущения: силы инерции пренебрежимо малы по сравнению с силой тяжести и силой вязкостного трения; градиент давления равен нулю; теплофизические параметры жидкости (за исключением плотности) постоянны, плотность является линейной функцией температуры.

Физическую сущность наиболее интенсивного гравитационного течения шлака вблизи цилиндрического стержня будем рассматривать в цилиндрической системе координат с учетом эффекта разжижения шлака, реологическое состояние которого описывается степенным законом Оствальда-де Виля. С учетом принятых допущений уравнение гравитационного течения в проекции на ось  $z$  принимает вид:

$$k \frac{\partial}{\partial r} \left\{ \frac{\partial V_z}{\partial r} \left[ \left( \frac{\partial V_z}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} \right)^2 \right]^{\frac{n-1}{2}} \right\} = -g(\rho_0 - \rho), \quad (1)$$

где  $g$  – ускорение силы тяжести,  $\text{м/с}^2$ ;  $\rho_0$  – плотность шлака вдали от цилиндрического стержня,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\rho$  – переменная плотность шлака в области гравитационного течения,  $\text{кг/м}^3$ ;  $V_z$ ,  $V_\varphi$  – вертикальная и тангенциальная компонента скорости,  $\text{м/с}$ .

Решая это уравнение с учетом изменения температуры в движущемся слое эмульсии и линейной зависимости ее плотности от температуры, получим уравнение скорости гравитационного течения в виде:

$$\bar{V}_z = \left( \frac{n}{2n+3} \right) \left( \frac{\rho_0 g \beta t_{cm}^*}{3k} \right)^{\frac{1}{n}} \delta^{\frac{n+1}{n}}, \quad (2)$$

где  $k^*$  – приведенная характеристика консистентности.

С использованием полученной зависимости выполнен расчет скорости циркуляционного течения эмульсии шлака и капель металла, вызванного тепловой конвекцией. Исходными данными для расчета служили теплофизические константы и показатели для шлака АНФ-6 и металлического расплава алюминид никеля  $\text{Ni}_3\text{Al}$  при температурах, характерных для рассматриваемого процесса ЭШН.

Расчетное значение скорости составляет  $0,042$   $\text{м/с}$ , а в данном случае скорость циркуляции шлака под действием электромагнитных сил составляет в среднем  $0,046$   $\text{м/с}$ . Поскольку эти потоки направлены встречно, то результирующая скорость на порядок меньше.

Таким образом, во вращающихся вокруг оси электрода двух торообразных потоках шлака формируется небольшая по величине результирующая сила, которая, влияя на движение эмульсии, позволяет увеличить время существования металлических капель, что повышает эффективность их металлургической обработки. С учетом квадратичной зависимости от скорости течения жидкости давление, оказываемое потоком эмульсии на поверхность сварочной ванны, становится почти на два порядка меньше, что приводит к формированию плоской межфазной поверхности на границе шлак-металл без образования на ней характерного для традиционных процессов ЭШС и ЭШН кратера, обуславливающего ухудшение свойств наплавленного металла.

#### Выводы

1. Выявлен подход к формированию термически стойкой композиционной структуры наплавленного ЭШН металла, учитывающий совокупное влияние на его сварочно-технологические свойства технологического, структурного и диффузионного факторов.

2. Оценен эффект от циркуляционных течений в шлаке, возникающих в процессе ЭШН, заключающийся в создании гидравлического подпора, способствующего образованию плоской межфазной границы шлак-металл, что

обеспечивает формирование направленно кристаллизованной композиционной структуры наплавленного металла.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Кусков, Ю. М.* Износостойкость и термическая выносливость наплавленного хромистого чугуна / Ю. М. Кус-

ков, И. И. Фрумин, Г. В. Ксендзык // Автоматическая сварка. – 1978. – № 6. – С. 64–67.

2. *Соколов, Г. Н.* Наплавка износостойких сплавов на прессовые штампы и инструмент для горячего деформирования сталей / Г. Н. Соколов, В. И. Лысак / ВолгГТУ. – Волгоград, 2005. – 284 с.