## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ШЛАКОВОЙ ВАННЫ ЭШН КОМПОЗИЦИОННЫХ СПЛАВОВ

УДК 621.79:536.2

#### Быстров В.А.

Сибирский государственный индустриальный университет «СибГИУ», Новокузнецк, e-mail: bistrov39@yandex.ru

Упрочнение сменных деталей металлургического оборудования, работающих при высокотемпературных видах износа, успешно осуществляется электрошлаковой наплавкой (ЭШН) композиционными материалами (КМ) на основе спечённого твёрдого сплава типа ТН 20. С целью повышения износостойкости сменных деталей, упрочнённых ЭШН КМ, выполнено математическое моделирование поведения твёрдых частиц в высокотемпературной зоне шлаковой ванны. В частности, определены основные факторы моделирования, воздействующие на износостойкость: скорость движения шлакового потока и твёрдых частиц, время пребывания и нагрев твёрдых частиц в высокотемпературной шлаковой зоне, влияние нагрева твёрдых частиц на износостойкость наплавленных деталей. В процессе моделирования температурное поле шлаковой ванны измеряли параллельно двумя способами: прямым - непосредственно термопарами, и косвенным – с использованием устройства для оценки удельной электропроводности жидких сред. Второй способ измерения температуры основан на известной температурной зависимости удельной электропроводности используемых расплавов флюса для ЭШН, которую замеряли разработанным устройством в процессе эксперимента. Взаимосвязанное численное описание теплового поля шлаковой ванны осуществляли с помощью методики, основанной на способе численного сеточного моделирования с использованием оператора Лапласа  $\nabla^2 T = \partial^2 T / \partial y^2 + \partial^2 T / \partial z^2$ . Определение температурных зон шлаковой ванны, нагрева и движения твёрдых частиц в шлаковом потоке осуществляли с помощью математического моделирования параметров ЭШН в каждом опыте полнофакторного эксперимента. Комплексная программа моделирования температурного поля шлаковой ванны направлена: на регулирование температурного режима, предотвращающего образование сложнолегированных структур на поверхности раздела твёрдая частица – матрица; на снижение термических напряжений и деформаций; на повышение высокотемпературной износостойкости упрочнённых леталей.

Ключевые слова: скоростная киносъёмка процесса ЭШН, температура нагрева зон шлаковой ванны, траектория движения шлакового потока, скорость движения и нагрев твёрдых частиц

## MATHEMATICAL MODEL TEMPERATURE FIELD OF SLAG OF ELECTROSLAG SURFACING COMPOSITE ALLOYS Bystrov V.A.

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, e-mail: bistrov39@yandex.ru

The strengthening of interchangeable parts of metallurgical equipment, working in high-temperature types of wear, is successfully carried out by electric slag surfacing (ESN) composite materials (KM) on the basis of baked solid alloy type TN 20. In order to increase the durability of interchangeable parts, reinforced by ESN KM, mathematical modeling of the behavior of solid particles in the high-temperature zone of the slag bath has been performed. In particular, the main factors of modeling, affecting durability: the speed of movement of slag flow and solid particles, the time of stay and heating of solid particles in the high-temperature slag zone, the effect of heating hard particles on the durability of melted parts. In the process of modeling, the temperature field of the slag bath was measured in parallel in two ways: direct – directly thermocouples, and indirect – using the device to assess the specific electrical conductivity of liquid environments. The second method of measuring temperature is based on the known temperature dependence of the specific electrical conductivity of the flux melts used for ESN, which were measured by the developed device during the experiment. The interconnected numerical description of the thermal field of the slag bath was carried out using a technique based on the method of numerical mesh modeling using the Laplace operator  $\nabla^2 T = \partial^2 T / \partial y^2 + \partial^2 T / \partial z^2$ . Determining the temperature zones of the slag bath, heating and movement of solid particles in the slag stream, carried out with the help of mathematical modeling of esn parameters in each experience of a full-factor experiment. A comprehensive program of modeling the temperature field of the slag bath is aimed at regulating the temperature regime, which prevents the formation of complex structures on the surface of the hard particle-matrix section; to reduce thermal stresses and deformations; to increase the hightemperature durability of hardened parts.

# Keywords: high-speed filming of electroslag surfacing, trajectory of movement of slag flow, speed of movement and heating of solid particles, temperature of slag bath zones

В области наплавки композиционных материалов (КМ) на основе твёрдых карбидных частиц имеется достаточное количество экспериментальных данных, разработанных авторами различных школ: СибГИУ [1–3], ВолгГТУ [4–6], ИС им. Е.О. Патона [7–9], так и зарубежных [10– 12]. Однако практически отсутствуют работы, исследующие процесс нагрева и взаимодействие твёрдых частиц с металлом-связкой, приводящих к образованию сложнолегированных структур в процессе наплавки. Прочность при высоких температурах и износостойкость КМ, упрочнённых твёрдыми частицами, как указывают авторы монографий [13–15], напрямую зави-

сит от физических факторов: температуры нагрева твёрдых частиц в шлаковой ванне; размера частиц и расстояния между ними; протяжённости зоны сплавления; теплофизических свойств сплава-связки (матрицы) и твёрдых частиц, а также объёмной доли упрочняющей фазы. Поэтому, учитывая повышенную прочность спечённых твёрдых сплавов TH 20 на изгиб и на сжатое  $\sigma_{_{\rm H3F}} = 1,15-1,60, \sigma_{_{\rm CK}} = 3,5-4,5$  ГПа, высо-кую микротвердость H<sub>µ</sub> = 18,5-22,0 ГПа, наибольшую вязкость среди спечённых твёрдых сплавов KCU = 0.9-1.2 МДж/м<sup>2</sup>, хорошую смачиваемость металлами группы железа (угол смачивания 0 град) и повышенную жаропрочность и жаростойкость, в работе были использованы в качестве износостойкой твёрдой фазы КМ при электрошлаковой наплавке (ЭШН) спечённые твёрдые сплавы на основе карбида титана типа TH 20 [2, 8, 16].

Для математического моделирования теплометрических параметров ЭШН КМ, обеспечивающих повышенную высокотемпературную износостойкость наплавленных деталей, установлены следующие цели:

– измерение удельной электропроводности и плотности тока ЭШН с целью моделирования температурного поля шлаковой ванны [1, 16, 17];

 исследование температурного поля
ЭШН с использованием взаимосвязанного численного описания электротеплового поля с помощью методики, основанной на способе численного сеточного моделирования [1, 18, 19];

 построение зон распределения температуры шлаковой ванны, нагрева и движения твёрдых частиц в шлаковом потоке, с помощью математического моделирования, основанном на параметрах ЭШН в каждом опыте [1, 19, 20];

– использование скоростной киносъёмки движения твёрдых частиц в шлаковой ванне, с целью определения траектории движения, нагрева и времени пребывания твёрдых частиц в высокотемпературной зоне ЭШН [3, 21, 22].

Для разработки перспективных способов ЭШН КМ на основе спечённого твёрдого сплава типа ТН 20 необходимо изучить влияние параметров ЭШН на температурные поля шлаковой ванны, с целью регулирования нагрева и взаимодействия твёрдых частиц в матрице КМ. Это позволит разработать рациональные способы подачи твёрдых частиц в зону наплавки, определить опорные значения режимов ЭШН, установить приёмы управления технологическими процессами, предотвращающие растворение твёрдых частиц в матрице и образование сложнолегированных структур в КМ [3, 7, 23].

### Материалы и методы исследования

Температуру в каждой точке шлаковой ванны можно моделировать с помощью удельной электропроводности шлака (по известной температурной зависимости), измеряемой в этой точке разработанным устройством. Устройство включает в себя датчик, источник напряжения Г на 100 мВ частотой 5 кГц, ламповый вольтметр V с диапазоном измеряемых напряжений до 100 мВ, универсальный амперметр A с диапазоном измеряемых токов 0,03...300 мА, переключатель П [1, 18, 19].

Моделирование температурного поля шлаковой ванны проводили с использованием экспериментально найденных краевых условий. Взаимосвязанное численное описание электрического и теплового, иначе электротеплового поля шлаковой ванны можно осуществить с помощью методики, основанной на способе численного сеточного моделирования. Учитывая нестационарный характер тепловых процессов при электрошлаковой наплавке КМ по слою шихты, и особенно при дозированной подаче твёрдых частиц в шлаковую ванну, при описании температурных полей в каждом сечении шлаковой ванны в предположении изотропности пространства за основу было взято уравнение теплопроводности на основе оператора Лапласа  $\nabla^2 T = \partial^2 T / \partial y^2 + \partial^2 T / \partial z^2 [1, 17, 18].$ 

Микротвердость КМ, в том числе отдельно матрицы и твёрдых частиц, измеряли в интервале температур 20–800 °С на установке ИМАШ-9-66, имеющей специальное устройство для такого измерения. Механические испытания на растяжение КМ проводили на установке ИМАШ-5С-69 «Киргизстан» для высокотемпературной металлографии и на установке Р-5, оборудованной печью с карборундовыми силитовыми нагревателями, что позволило проводить испытания в интервале температур 20–800 °С [23–25].

# Результаты исследования и их обсуждение

При электрошлаковой наплавке (ЭШН) композиционных материалов (КМ) неплавящимся электродом используются в основном две основные схемы: по слою шихты и вертикальная наплавка [3, 9, 24]. В обоих случаях явление массопереноса в шлаковой ванне оказывает существенное влияние на температурное поле ЭШН и нагрев твёрдых частиц. Кроме того, при подаче твёрдых частиц типа TH 20 через слой шлака массоперенос оказывает влияние на траекторию движения и нагрев частиц твёрдого сплава ТН 20 в высокотемпературной зоне, следовательно, вызывает интерес скорость движения частиц ТН 20 и расплава шлака как внутри, так и на свободной поверхности шлаковой ванны.

Теоретическое определение температуры квазистационарного теплового поля в каждой точке шлаковой ванны даже при неизменных параметрах ЭШН: объёме, удельной теплоёмкости, теплопроводности и массе шлака – задача весьма сложная. В процессе исследования температуру в каждом элементарном объёме шлаковой ванны измеряли параллельно двумя способами: прямым – посредством термопары, и косвенным - с использованием устройства для оценки удельной высокотемпературной электропроводности жидких сред. Установка датчика и подготовка к измерению при прямом и косвенном способах подобны, но имеются различия в конструкции измерительных устройств и в методике оценки температуры.



Рис. 1. Схема замера температур шлаковой ванны прямым способом при ЭШН: 1– неплавящийся графитовый электрод; 2 – графитовая заглушка; 3 – шлаковый гарнисаж; 4 – термопара в чехле; 5 – рабочий спай термопары; 6 – алундовая соломка

В первом случае основным датчиком служила вольфрам-рениевая термопара BP-5/20, которая вставлялась в алундовый чехол с наружным диаметром 11 мм и толщиной стенки 3 мм. Датчик устанавливался горизонтально в подвижной графитовой заглушке толщиной 30 мм (рис. 1), причём рабочий конец термопары совмещался с центром изучаемого локального объёма шлаковой ванны, находившегося в её плоскости симметрии. Для повышения сохранности датчика в период выхода на заданные параметры ЭШН перед ним устанавливали дополнительный графитовый экран, который убирали в процессе стабилизации, и электрод возвращался в исходное положение. При этом в комплекте с термопарой использовали двухкоординатный потенциометр КСП-4 [1, 18, 20].

Температуру приграничных зон шлаковой ванны определяли прямым путём с помощью термопары ВР-5/20 и потенциометра КСП-4. Использование для этой цели косвенного способа часто невозможно, так как удельная электропроводность шлака при температурах приграничных слоёв ниже 1050 °С близка к нулю. При изучении приграничного с кристаллизатором слоя шлаковой ванны использовали кварцевый чехол с изогнутой под 45 град. концевой частью. Его опускали в ванну и в исследуемой точке утыкали концом в образующийся на стенке кристаллизатора гарнисаж. В детали сверлили сквозные отверстия, в которые снизу вставляли алундовые соломки с термопарами. Рабочие спаи термопар непосредственно контактировали с приграничным с деталью слоем шлака. При измерении температуры на границе шлак – воздух применяли кварцевый чехол, который вместе с термопарой погружали в шлак на 2...3 мм.

Косвенный способ измерения температуры в элементарном объёме шлаковой ванны основан на известной завиудельной электропроводности симости большинства расплавленных флюсов для ЭШН от температуры. Для каждого флюса соответствующая зависимость была получена разработанным датчиком в процессе эксперимента. Температуру в каждой точке шлаковой ванны можно косвенно оценивать по удельной электропроводности шлака, измеряемой в этой точке разработанным датчиком. Устройство включает в себя датчик, источник напряжения Г на 100 мВ частотой 5 кГц, ламповый вольтметр V с диапазоном измеряемых напряжений до 100 мВ, универсальный амперметр А с диапазоном измеряемых токов 0,03...300 мА, переключатель П. Датчик содержит 8 электродов из вольфрамовой проволоки диаметром 0,5 мм, которые введены в алундовые трубки с наружным диаметром 3,4 мм. Трубки помещены в кварцевый цилиндр, пространство между трубками и цилиндром заполнено спечённым алундовым порошком. На рабочем конце датчика электроды выступают из алундовых трубок на 1 мм, которые непосредственноконтактируютсрасплавомшлака.



Рис. 2. Датчик и принципиальная схема для косвенного измерения температуры: П – переключатель; Р – потенциометр КСП-4; 1 – первый токовый электрод; 2 – второй токовый электрод; 3 – спечённый алундовый порошок; 4 – кварцевая трубка

Один конец измерительной цепи (рис. 2) через переключатель П соединяется с вспомогательными (контрольными) электродами 3...8 датчика, размещёнными радиально вокруг основного (токового) электрода l, который подсоединён ко второму концу токовой цепи. Под токовыми электродами l и 2 понимаются электроды, через которые протекает ток от источника питания устройства по цепи: источник  $\rightarrow$  токовый электрод  $l \rightarrow$  шлаковая ванна  $\rightarrow$  токовый электрод  $2 \rightarrow$  амперметр  $A \rightarrow$  выключатель  $B \rightarrow$  источник.

Датчик погружали в шлаковую ванну так, чтобы выступающий из трубки рабочий конец токового электрода *l* совпадал с центром изучаемой локальной области. В момент измерения ток наплавки отключали, а тумблер устройства *B* включали. Последовательно измеряли падения напряжения  $U_3...U_8$  между первым токовым электродом *I* и каждым из контрольных электродов *3...8*. Дополнительно измеряли ток, протекающий через электроды *I*–2. В промежутках между опытами включали повышенный ток наплавки для прогрева ванны до рабочих температур, чтобы режим наплавки соответствовал базовому:  $I_{\rm m} = 350$  A,  $U_{\rm m} = 40$  B. При достижении в форсированном режиме тока  $I_{\phi.\rm{m}}$  источник питания отключали и проводили новое параллельное измерение. Общее время всех замеров одним датчиком не превышало 3 мин.

После статистической обработки данных параллельных измерений удельную электропроводность локального объёма шлаковой ванны оценивали по формуле (1) [1, 18, 19]:

$$\hat{\mathbf{q}} = \frac{KI}{0,773(U_3 + U_6) + 1,322 \times (U_4 + U_6 + U_7 + U_8)}, \ [\text{O}_{\text{M}^{-1}}, \text{M}^{-1}]$$
(1)

где *К* – константа устройства; *I* – ток, усреднённый по результатам параллельных опытов,

А;  $\overline{U}_3...\overline{U}_8$  – средние (по данным параллельных опытов) падения напряжения на участке ванны между первым токовым и соответственно одним из контрольных электродов 3...5, В.

Константу K предварительно определяли по данным контрольных измерений. Относительная погрешность косвенного способа измерения температуры, посредством замера удельной электропроводности разработанным датчиком при рабочих температурах до 1700 °С, составляет менее 5 %. Целесообразность комплексного измерения обусловливается наличием случайных помех, влияющих на оценки температуры. Для повышения достоверности результатов оценки, полученные прямым и косвенным способами, усредняли.

Математическое моделирование температурного поля шлаковой ванны проводили с использованием экспериментально найденных краевых условий. Взаимосвязанное численное описание теплового поля шлаковой ванны осуществляли с помощью методики, основанной на способе численного сеточного моделирования [1, 18, 19]. При моделировании начало координат располагается в центре дна прямоугольной шлаковой ванны с наплавленным слоем. Ось абсцисс Х направлена по ходу движения, ось ординат У – поперёк детали, ось аппликат Z – вертикально вверх. Предполагается, что краевые условия задачи моделирования температурных полей шлаковой ванны соответствуют симметрии температуры относительно оси аппликат. Учитывая нестационарный характер тепловых процессов при наплавке КМ по слою шихты, и особенно при дозированной подаче твёрдых частиц в шлаковую ванну, при описании температурных полей в каждом сечении ванны в предположении изотропности пространства за основу было взято уравнение теплопроводности (2) [1, 17, 18]:

$$\partial T / \partial \tau = \alpha \nabla^2 T + q_v / (c \rho),$$
 (2)

где  $T = f(X, Y, Z, \tau)$  – температура в точке шлаковой ванны с координатами, X-const, У, Z в момент времени  $\tau$ ;  $\alpha = \lambda/(c\rho)$  – средняя температуропроводность;  $\lambda$  и с – средние теплопроводность и удельная теплоёмкость;  $\rho$  – средняя плотность шлака в описываемом диапазоне температур;  $q_v$  – плотность теплового потока в элементарном объёме;  $\nabla^2 T = \partial^2 T/\partial y^2 + \partial^2 T/\partial z^2$  – оператор Лапласа, записанный для двумерной области в декартовой системе координат.

Поскольку основные параметры ЭШН ток и напряжение ( $I_{\mu}$  и  $U_{\mu}$ ) становятся постоянными только при установившемся процессе, следовательно, их нельзя использовать как независимые, с этой целью был реализован план полнофакторного эксперимента 2<sup>3</sup> (табл. 1) с тремя независимыми параметрами: диаметр электрода  $D_{3}$ , межэлектродный промежуток (расстоянием между электродом и наплавляемым слоем)  $H_{\mu}$  и сопротивление балластных реостатов  $R_{5}$ .

По результатам замеров при пятикратном дублировании опытов изучали распределение температур шлаковой ванны и наплавленного металла. Поиск значений коэффициентов *T<sub>r</sub>* и *K<sub>r</sub>* для каждого опыта осуществляли методом наименьших квадратов. Коэффициенты полученных уравнений рассматривались в качестве откликов эксперимента. В результате статистической обработки данных эксперимента найдены регрессионные зависимости, связывающие коэффициенты степенных уравнений с параметрами ЭШН [1, 18, 19]:

$$T = T_{\rm r} e^{-K_{\rm r} \cdot r^2}, \qquad (3)$$

$$+0,055 \cdot 10^{-4} R_{6}' + 0,2 \cdot 10^{-4} H_{M2}' \cdot J_{2}';$$

$$\Pi_{3}' = (\Pi_{3} - 3, 0)/0, 5; H_{M3}' = (H_{M3} - 1, 1)/0, 3;$$

$$R_{6}' = (R_{6} - 0.115)/0.025.$$
 (5)

Подставляя параметры ЭШН в уравнения 3–5, можно оценить температуру шлаковой ванны и наплавленного КМ. Рассчитанные на ЭВМ кривые распределения температур на поверхности наплавленного КМ хорошо согласуются с экспериментальными данными, приведёнными на рис. 3. На основе этих данных температурное поле шлаковой ванны было описано рядом изотерм. Для нахождения параметров в промежуточных точках шлакового объёма между экспериментальными точками использовалась линейная интерполяция.

Таблица 1

N⁰	Параметры режима наплавки				Усреднённые значения полученных данных опыта					
опыта	$H_{\rm M}$ , мм	$D_{_{2}}$ , мм	<i>R</i> <sub>б</sub> , Ом	<i>I</i> <sub>н</sub> , А	<i>V</i> <sub>max</sub> , м/с	$f_n$ , H/M <sup>3</sup>	$f_k$ , H/m <sup>3</sup>	T°C TH 20	<i>t</i> , c	
1	8	35	0,09	610	0,40	422	647	1470	0,72	
2	14	35	0,09	515	0,67	318	691	1360	0,62	
3	14	35	0,14	465	0,60	247	685	1330	0,60	
4	8	35	0,14	540	0,30	338	756	1390	0,65	
5	15	25	0,14	370	0,38	416	1296	1340	0,62	
6	8	25	0,14	300	0,56	278	904	1280	0,52	
7	14	25	0,09	380	0,35	459	929	1230	0,46	
8	8	25	0,09	330	0,77	317	1347	1190	0,40	
$H_{_{\rm M}}$ – межэлектродный промежуток, мм; $D_{_{9}}$ – диаметр электрода, мм; $R_{_{6}}$ – сопротивление балласт- ных реостатов, Ом; $I_{_{9}}$ – ток наплавки ЭШН, А; $v_{_{max}}$ – скорость движения твёрдых частиц в шлаковой										
ванне, м/с; $f_n$ – пондеромоторные силы движения расплава, Н/м <sup>3</sup> ; $f_k$ – конвективные силы движения расплава, Н/м <sup>3</sup> ; T <sup>0</sup> C – температура нагрева твёрдых частиц; $t$ – время движения (пребывания) твёр-										
дой частицы в шлаковой ванне, с										

План полнофакторного эксперимента параметров ЭШН

По результатам математического моделирования строили распределение температуры шлаковой ванны в каждом опыте и в центре плана эксперимента. Наибольший интерес с точки зрения качества наплавленного слоя представляет анализ температур в хвостовой области шлаковой ванны, пройденной электродом. Пример построения температурного поля по продольному сечению шлаковой ванны показан на рис. 3. Характер распределений температуры является общим для всех построений: расширение области нагрева сразу за электродом с её последующим сужением и поднятием к поверхности ванны, вследствие охлаждения.

Для определения характера и численных значений скоростей движения расплава шлака и твёрдых частиц, вносимых в шлаковую ванну, широкое распространение получила киносъёмка [3, 21, 22]. Ввиду труднодоступности исследуемых зон, высокой температуры и агрессивности шлака, применение других средств измерения скоростей движения твёрдых частиц в жидкой шлаковой ванне затруднительно. В настоящей работе киносъёмка проводилась в видимых лучах при установившемся процессе ЭШН кинокамерой «Красногорск-2» со скоростью 24 кадра в секунду через нейтральный фильтр (рис. 4). Для визуализации движения твёрдых частиц в расплаве шлаковой ванны во время киносъёмки на определённую поверхность шлаковой ванны подавали частицы твёрдого сплава различной фракции 0,60-2,8 мм. На кинограмме (рис. 4) движения расплава шлака на свободной поверхности шлаковой ванны видно, что электрод в области сухого вылета нагрет меньше, чем шлак, и хорошо контрастирует с ним. Таким образом, определение места вхождения электрода в шлак не представляет трудностей. В течение всего времени движения по линии АА твёрдые частицы TH 20 остаются достаточно холодными и на изображении фиксируются в виде темных точек на яркой поверхности шлаковой ванны. В каждом опыте киносъёмку движения твёрдых частиц производили восемь раз. При обработке результатов эксперимента расстояние от электрода до кристаллизатора по линии АА разбивали на три равных участка со скоростями соответственно v1, v2, v3. Замер скоростей производили на монтажном столике с учётом масштаба изображения по величине перемещения твёрдых частиц от кадра к кадру. Интервал времени между кадрами известен и составляет 1/24 с.

После проведения эксперимента с помощью полнофакторного эксперимента построены регрессионные уравнения, связывающие средние скорости  $v_1$ ,  $v_2$ ,  $v_3$  параметрами ЭШН получения КМ (6) [3, 18, 20]:

0 1 5 · 0 000 D

$$v_{1} = 0,15 + 0,008 D'_{9} - -0,006 D'_{9}H_{M,9} - 0,009 D'_{9}R'_{6};$$
$$v_{2} = 0,164 - 0,009 D'_{9}H_{M,9} - 0,007 D'_{9}R'_{6};$$
$$v_{3} = 0,115 + 0,0073 H_{M,9} - -$$

$$-0,004 D_{3}^{`}H_{M2}^{}-0,004 D_{3}^{`}R_{6}^{`}$$
 (6)

где  $D_{3}^{`} = (D_{3} - 30)/5; H_{M,3} = (H_{M,3} - 11)/3;$  $R_{6}^{`} = (R_{6} - 0,115)/0,025.$ В табл. 2 даётся анализ качества мо-

В табл. 2 даётся анализ качества моделирования скорости движения твёрдых частиц в расплаве шлака. Наблюдается систематическая абсолютная ошибка моделирования скорости, которая в направлении от электрода в начале отрицательна, затем меняет знак и продолжает расти. В качестве возможных причин этого явления можно



Рис. 3. Температурное поле шлаковой ванны (поперечное и продольное), рассчитанное методом моделирования (сплошные линии) и замеренное термопарами (пунктирные линии)

20

указать раздельный аддитивный характер учёта в модели конвективных и электромагнитных сил, а поскольку модель построена для квазистационарных условий, не учитывающих зависимость жидкотекучести шлака от температуры, что, естественно, улавливают натурные измерения.

Для контроля проведено измерение скорости  $\overline{\nu}$  движения потока шлака механическим устройством (графитовой вертушкой на оси), как на свободной поверхности, так и во внутренних объёмах шлаковой ванны с помощью киносъёмки через кварцевое стекло. Плавное изменение тока наплавки  $I_{\rm M}$  и межэлектродного промежутка  $H_{\rm M.3}$  на 20–30% слабо сказывается на скорости движения твёрдых частиц и расплава шлака, меняющихся при этом на 10–15%. Это обуславливает близость результатов измерения скорости движения частиц механическим

устройством (вертушкой) и киносъёмкой, полученных для несколько отличных условий [1, 19, 22].

Как показывают результаты исследований в широком рабочем диапазоне изменения параметров ЭШН КМ неплавящимся электродом, направление движения потока расплава жидкого шлака и траектория движения твёрдых частиц на свободной поверхности шлаковой ванны всегда постоянно: от электрода к кристаллизатору. Это способствует траектории движения твёрдых частиц по сравнительно низкотемпературным участкам жидкого шлака, в которых твёрдые частицы нагреваются не выше температуры шлака 1150...1250 °С и, попадая в расплав сплава-связки, хорошо им смачиваются. Такой температурный режим предохраняет твёрдые частицы от чрезмерного разогрева, а следовательно, исключает



Рис. 4. Скоростная киносъёмка движения твёрдых частиц в шлаковой ванне

	Скорости движения расплава, м/с									
Onbit	v <sub>I</sub>				$v_2$		v <sub>3</sub>			
	Изме- ренная	Моделиро- ванная	Абсол. ошибка	Изме- ренная	Модели- рованная	Абсол. ошибка	Изме- ренная	Модели- рованная	Абсол. ошибка	
1. a	0,173	0,150	-0,023	0,180	0,200	+0,020	0,126	0,170	+0,044	
2.б	0,161	0,140	-0,021	0,162	0,200	+0,038	0,122,	0,160	+0,038	
З. в	0,143	0,110	-0,033	0,148	0,180	+0,032	0,130	0,160	+0,030	
4. г	0,155	0,11	-0,044	0,166	0,200	+0,034	0,128	0,160	+0,032	
5.д	0,157	0,120	-0,037	0,180	0,200	+0,020	0,130	0,160	+0,030	
6. e	0,145	0,110	-0,035	0,162	0,180	+0,018	0,143	0,160	+0,017	
7. ж	0,139	0,120	-0,019	0,166	0,180	+0,014	0,122	0,140	+0,018	
8.3	0,127	0,140	0,013	0,148	0,160	+0,012	0,144	0,146	+0,002	
	Средняя абсолютная ошибка – 0,027			Средняя абсолютная ошибка + 0,023			Средняя абсолютная ошибка + 0,026			

Ошибки моделирования движения твёрдых частиц в шлаковой ванне

Таблица 2

СОВРЕМЕННЫЕ НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ № 6, 2020

интенсивное растворение ТН 20 в жидкой матрице КМ [26–28].

В большинстве опытов максимальной являлась скорость v<sub>1</sub>∈{0,140; 0,195} м/с. Несколько меньше скорость  $v_2 \in \{0, 120; 0, 176\}$  м/с. Скорость v,∈{0,99; 0,138} м/с была минимальна. Свободный член максимален в уравнении для v, и минимален в уравнении для v<sub>3</sub>. Совместное влияние межэлектродного промежутка Н<sub>м</sub> и диаметра электрода  $D_{2}$  на все три скорости отрицательное и наибольшее для v2. Совместное влияние диаметра электрода  $D_{1}$  и сопротивления балластных реостатов  $R_{6}$  на все скорости также отрицательное. На скорость v, параметры режима наплавки существенного самостоятельного влияния не оказывают. В то же время возле электрода скорость движения v<sub>1</sub> значительно растёт с ростом его диаметра, а  $v_3$  ближе к кристаллизатору существенно увеличивается с повышением межэлектродного промежутка. С использованием уравнений (2) и (6) на основе моделирования построены графики, представленные на рис. 5.



Рис. 5. Зависимость нагрева и скорости движения расплава шлака от параметров ЭШН

Направление движения расплава шлака по свободной поверхности шлаковой ванны является отражением направления движения жидкости в объёме ванны. Хорошо прогретые восходящие потоки проходят вдоль свободной поверхности ванны, препятствуя образованию на ней корки закристаллизовавшегося шлака. Попадая на поверхность шлаковой ванны, твёрдые частицы покрываются шлаковым гарнисажем и становятся своеобразными макрохолодильниками, что предотвращает их интенсивный перегрев и растворимость.

Для горизонтальной ЭШН по слою шихты получена статистическая зависимость средней температуры  $T_{cn}$ °С в зоне сплавления КМ с основным металлом в зависимости от функций параметров ЭШН (7) [3, 18, 20]:

$$T_{\rm cp} = 604, 5 - 5750 \cdot R_{\rm 6} + 434, 37 \cdot V_{\rm H} + 81, 25 \cdot F_{\rm 9} - 46, 875 \cdot V_{\rm H} \cdot F_{\rm 9} , \qquad (7)$$

где  $R_6$  – сопротивление балластных реостатов (Ом) для регулирования тока наплавки, А;  $V_{\mu}$  – скорость наплавки, м/ч;  $F_{3}$  – поперечное сечение электрода, см<sup>2</sup>.

Приведённые модельные описания движения расплава шлака под действием конвективных тепловых и электромагнитных сил дали возможность проследить поведение в шлаковой ванне твёрдых частиц, вводимых через шлаковую ванну. Дифференциальное уравнение движения твёрдой частицы в виде шара в вязкой жидкости имеет вид [3, 23, 24]:

$$\frac{dV_r}{dt} = g \frac{\rho_r - \rho_{\rm III}}{\rho_r} - C_x \frac{1}{2} \cdot \frac{3 \cdot V_r^2}{4 \cdot R_r}, \qquad (8)$$

где  $V_r = \upsilon / R_r$  – скорость опускания твёрдой частицы в виде шара, м/с ( $\upsilon$  – кинематическая вязкость шлака);  $R_r$  – радиус твёрдой частицы, м; t – время пребывания твёрдой частицы в расплаве шлака, с;  $\rho_r$  – плотность материала твёрдой частицы, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{\rm шл}$  – плотность расплава шлака, кг/м<sup>3</sup>;  $C_x$  – безразмерный коэффициент гидродинамического сопротивления.

По выполненным исследованиям определяли распределение температуры наплавленного слоя. На установке ИМАШ-9-66 были воспроизведены температурные режимы ЭШН с последующей выдержкой в течение 10 мин и замерены микротвердость как твёрдых частиц Н<sub>µ,к</sub>, так и матрицы Н<sub>µ,М</sub> КМ, при заданных температурах. Относительная износостойкость є<sub>отн</sub>, КМ ТН 20 + колмоной была рассчитана по известной зависимости [3, 23, 24]:

$$\varepsilon_{_{OTH}} = \frac{H_{\mu_{_{M}}}^{^{T}} \cdot K_{_{M}}^{^{T}} \cdot (1 - \gamma) + 0.82H_{\mu_{_{K}}}^{^{T}} \cdot K_{_{K}}^{^{T}} \cdot \gamma^{^{T}}}{H_{\mu_{_{M}}}^{^{3}} \cdot K_{_{M}}^{^{3}} \cdot (1 - \gamma) + 0.82H_{\mu_{_{K}}}^{^{3}} \cdot K_{_{K}}^{^{3}} \cdot \gamma^{^{3}}}, (9)$$

где  $H^{T}_{\mu,m}$ ,  $H^{9}_{\mu,m}$  – микротвердость матрицы, МПа;  $H^{T}_{\mu,\kappa}$ ,  $H^{9}_{\mu\kappa}$  – микротвердость карбидов (спечённые твёрдые частицы TH 20), МПА;  $K^{T}_{m}$ ,  $K^{9}_{m}$ ,  $K^{T}_{\kappa}$ ,  $K^{9}_{\kappa}$  – эмпирический коэффициент соответственно матрицы и спечённой твёрдой частицы на основе карбидов титана;  $\gamma$  – доля твёрдых частиц в KM; индекс Т – измерения при заданных температурах; индекс  $\mathfrak{I}$  – измерения для сплава, выбранного за эталон.

Большое влияние на качество наплавленного слоя оказывает главным образом

22

пребывание твёрдых частиц в области высоких температур шлаковой ванны. Для сравнения на установке ИМАШ-9-66 физически моделировались температурные режимы того же КМ без предварительного прохождения твёрдых частиц через слой жидкого расплава шлака, температура которого в некоторых точках (близлежащих к электроду) достигает 1750 °С. Температурные режимы, моделируемые ИМАШ-9-66, представляют собой на быстрый нагрев и выдержку за 10 мин до температуры точки попадания твёрдой частицы в зону наплавки, отстающую от оси симметрии на величину  $r_{a}$ . По замеренной микротвердости матрицы и твёрдых частиц для КМ и эталона – сплав сормайт (УЗ0Х28Н4С4) при различных температурах, по формуле (9) была рассчитана температурная зависимость износостойкости  $\varepsilon_{0TH}$ , которая составила для 20 °C  $\varepsilon_{20} = 2,2$  и  $\varepsilon_{500} = 3,16$ . Таким образом, поскольку составляющие КМ лучше и дольше сохраняют свои первоначальные свойства с повышением температуры, а эталон (сплав сормайт) начинает активно разупрочняться с повышением температуры испытания, относительная износостойкость КМ с повышением температуры возросла почти в 1,5-2,5 раза (рис. 6).



Рис. 6. Зависимость относительной износостойкости  $\varepsilon_{_{OMH}}$  КМ от максимальной температуры наплавленного слоя

Наиболее благоприятное влияние на свойства КМ оказывает подача твёрдых частиц в наименее перегретую область шлаковой ванны. При радиусе дозирования  $r_{d} = 20$  мм снижение относительной износостойкости превышает 3 %. По мере удаления точки дозирования от поверхности электрода степень влияния шлаковой ванны на свойства твёрдых частиц постепенно ослабевает и резко падает у поверхности кристаллизатора. Однако при подаче твёрдых частиц в холодную часть шлаковой ванны возникает опасность образования шлакового гарнисажа вокруг частиц твёрдого сплава, который не успевает расплавиться при попадании твёрдых частиц в расплав матрицы, что приводит к образованию шлаковых включений в КМ. В этом случае возможно несплавление твёрдых частиц с матрицей, а следовательно, при абразивном износе такие частицы будут быстро выкрашиваться, что снижает износостойкость наплавленного КМ.

Проведённые исследования показали, что разработанные КМ имеют объёмную долю твёрдых частиц в матрице выше критических величин (примерно 54–57%), что привело к минимальному образованию сложнолегированных структур и выделению нежелательных фаз на поверхности раздела [2, 26–28]. Рентгеноструктурным анализом установлено, что наиболее распространённой фазой в матрице КМ ТН 20 + колмоной является борокарбид хрома и железа типа М7(СВ)3, которые наблюдаются в виде светлых зёрен округлой формы длиной до 0,56 мм. [2, 24, 25].

#### Выводы

1. Моделирование температурного поля шлаковой ванны позволило установить, что оптимальным температурам наплавки КМ  $T_{\text{опт}} = 1150-1350 \,^{\circ}\text{C}$  соответствуют режимы ЭШН:  $I_{\text{H}} = 350-420 \,\text{A}$ ;  $U_{\text{шв}} = 32-38 \,\text{B}$ ;  $V_{\text{H}} = 0,8-\text{I},2 \,\text{ м/ч}$ ;  $H_{\text{м}} = 12-14 \,\text{ мм}$ ;  $\mathcal{I}_{\text{s}} = 35-40 \,\text{ мм}$ ;  $\mathcal{B}_{\text{шв}} = 65-100 \,\text{ мм}$ .

2. Составленное регрессионное уравнение полнофакторного эксперимента зависимости температуры наплавленного КМ от параметров режима ЭШН позволило определить оптимальные области подачи частиц твёрдого сплава в расплав матрицы, с целью предотвращения растворения твёрдых частиц в матрице.

3. Применение разработанных устройств для математического моделирования температурного поля шлаковой ванны, посредством определения удельной электропроводности расплава жидкого шлака, позволило снизить вмешательство в нормальный ход технологических процессов, повысить точность измерений, а следовательно, повысить высокотемпературную износостойкость КМ.

4. Найденные закономерности изменения скорости движения расплава на свободной поверхности шлаковой ванны в зависимости от параметров режима ЭШН можно использовать как для отработки технологии наплавки, так и при создании моделей шлаковых ванн.

#### Список литературы

1. Быстров В.А. Основы электрошлаковых технологий упрочнения композиционными сплавами деталей, работающих при высокотемпературном износе: дис. ... докт. техн. наук. Барнаул, 2003. 337 с.

2. Быстров В.А. Эффективность упрочнения сменных деталей металлургических агрегатов твёрдым сплавом // Известия ВУЗ ЧМ. 2018. № 12 (61). С. 939–947.

3. Быстров В.А., Борисова Т.Н., Грекова Н.Ю., Франк Е.Я. Управление процессом упрочнения твёрдым сплавом сменных деталей металлургического оборудования // Фундаментальные исследования. 2018. № 3. С. 7–12.

4. Sokolov G.N. The Formation of Nanodispersed Composite Metal Structure with Electroslag Surfacing. Modern Applied Science. 2015. Vol. 9. No. 9. P. 333–343.

5. Колокольцев В.М., Вловин К.Н., Чернов В.П., Феоктистов Н.А., Горленко Д.А., Дубровин В.К. Исследование механизмов абразивного и ударно-абразивного изнашивания высокомарганцевой стали // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2017. Т. 15. № 2. С. 54–61.

6. Потекаев А.И., Хохлов В.А., Галсанов С.В. Природа и механизмы абразивного изнашивания материалов с памятью формы на примере TiN // Известия Томского политех. ун-та. 2012. Т. 321. № 2. С. 107–111.

 Медовар Б.И., Самойлович Ю.А., Емельяненко Ю.Г., Кошман В.С. ЭШП с вводом металлических частиц (математическое моделирование) // Электрошлаковый переплав. 2013. Вып. 6. С. 151–156.

 Кусков Ю.М. Электрошлаковый процесс и технологии наплавки дискретными материалами в токоподводящем кристаллизаторе: автореф. дис. ... докт. техн. наук. Киев, 2010. 33 с.

9. Кусков Ю.М., Гордань Г.М., Богайчук И.Л., Койда Т.В. Электрошлаковая наплавка дискретным материалом различного способа изготовления // Автоматическая сварка. 2015. № 5–6 (742). С. 38–42.

10. Haddad M., Zitoune R., Bougherera H. Study of trimming damages of TiC/TiN structures in function of the machining processes and their impact on the mechanical behavior. Composites Part B: Engineering. 2014. Vol. 57. P. 136–143.

11. Halleck H. Preparation and behavior of wear-resistant TiC-TiB2; and TiC-TiN coatings with high amounts of phase boundaries. Surf. Coat. Techn. 2008. Vol. 36. № 5. P. 707–714.

12. Kivineva E.I., Olsom D.L., Matlock D.K. Particulate reinforced metal matrix composite (TiC) as a weld deposited. Welding J. 2015. № 3. P. 83–92.

13. Aboudi J., Arnold S., Bednarcyk B. Micromechanics of Composite Materials. Elsevier, 2013. 984 p.

14. Brebbia C.A., Klemm A. Materials Characterizations VI: Computational Methods and Experiments. M.: WIT Press. Glasgow Caledonian University, 2013. 364 p. 15. Dvorak G. Micromechanics of Composite Materials. Springer, 2013. 442 p.

16. Патон Б.Е., Медовар Б.И. Исследование магнитогидродинамических явлений в шлаковой ванне при ЭШН. ПСЭ // Научная мысль.1982. Вып. 17. С. 3–8.

17. Дудко Д.А., Товмач В.С. Электрические, магнитные и тепловые поля в шлаковой ванне при ЭШН // Автоматическая сварка. 2013. № 2. С. 38–40.

18. Верёвкин В.И., Быстров В.А., Белоусов П.Г. Моделирование температурных полей шлаковой ванны при электрошлаковой наплавке // Известия вузов. Чёрная металлургия. 2004. № 6. С. 52–55.

19. Верёвкин В.И. Оптимизация режима ЭШН композиционных сплавов с использованием имитационного моделирования / Минобр. РФ, Кузбасская государственная педагогическая академия; Новокузнецк: Издательство КузГПА, 2012. 103 с.

20. Верёвкин В.И., Ростовцев А.Н., Сакун А.Ф. Воздействие режима электрошлаковой наплавки на кинетику нагрева твёрдых частиц // Известия вузов. Чёрная металлургия. 2004. № 8. С. 39–41.

21. Дудко Д.А., Волошкевич Г.З., Сущук-Слюсаренко И.И., Лычко И.И. Исследование электрошлакового процесса с помощью кинофотосъёмки через прозрачную среду // Автоматическая сварка. 2012. № 7. С. 15–17.

22. Верёвкин В.И., Быстров В.А. Измерение скорости движения расплава шлака при ЭШП // Изв. вузов. Чёрная металлургия. 2013. № 4. С. 18–20.

23. Bystrov V.A., Borisova T.N. The role of particulate composite materials, operating at high temperature wear. In the World of Scientific Discoveries / Publishing House Science and Innovation Center, Ltd. 3558 South Jefferson Ave, St. Louis, Missouri 63118, USA. 2014 Vol. 2. № 2. P. 17–23.

24. Быстров В.А., Трегубова О.Г. Термодинамическая совместимость твёрдых частиц с матрицей КМ // Доклады АН ВШ. 2015. № 4. С. 255–267.

25. Bystrov V.A., Borisova T.N. Borating of solid particles composite materials. In the World of Scientific Discoveries. Publishing House Science and Innovation Center, Ltd. 3558 South Jefferson Ave, St. Louis, Missouri 63118, USA. 2015. Vol. 2. № 2. P. 17–23.

26. Кульков С.Н., Рудай В.В. Микроструктура композиционного материала TiC-TiNi с микроградиентной структурно-неустойчивой матрицей // Изв. вузов. Физика. 2012. № 5/2. С. 167–169.

27. Zambrano O.A. Effect of normal load on abrasive wear resistance and wear micromechanics in alloy and other steels. Wear, 2016. V. 348–349. P. 61–68.

28. Cubota Naoky, Nishida Minory. Creation of composite alloys with TiN particles and their wear resistance / Met. Fac. Eng. Ehime Univers. 2012. № 1. P. 125–132.