

УДК 621.793.620.172

Теплофизические особенности ЭШН жаропрочного сплава на основе Ni₃Al

© 2004 **И.В.Зорин, Г.Н.Соколов, В.И.Лысак, С.Н.Цурихин**

Волгоградский государственный технический университет
E-mail: kewa991@yandex.ru
Поступила в редакцию 26 февраля 2004 г.

Рассмотрены теплофизические особенности ЭШН в малогабаритном токоведущем секционном кристаллизаторе с полым графитовым электродом. Показано, что введение полого электрода в центр шлаковой ванны на небольшую глубину приводит к образованию в ней высокотемпературной области, в которой шлак нагрет до температуры кипения. В перегретом шлаке возможно равномерное расплавление как туго- так и легкоплавких компонентов наплавочного композиционного стержня, обеспечивающего получение жаропрочного наплавочного сплава на основе алюминида никеля.

Thermal features of the process of electroslag surfacing with the use of a small-scale current-carrying sectional crystallizer with a hollow graphite electrode is considered. It is shown that introduction of hollow electrode at shallow depth in the center of slag bath leads to formation of high-temperature region in the bath wherein the slag is heated up to boiling point. An uniform melting both the refractory and low-melting components of composition core in overheated slag is possible that provides the production of heat-resistant surfacing alloy on the base of nickel aluminide.

Введение

Электрошлаковая наплавка (ЭШН) в секционном токоведущем кристаллизаторе (СК) является эффективной технологией упрочнения износостойкими сплавами малогабаритных (диаметром до 50 мм) торцов деталей оборудования и инструмента. Наплавка в СК электронейтральным присадочным материалом позволяет получать высококачественный металл за счет эффективной металлургической обработки металлического расплава перегретым шлаком и обеспечения его направленной кристаллизации. Известна ЭШН в СК для упрочнения прошивного и другого инструмента, работающего в условиях циклического температурно-силового воздействия (ЦТСВ) при температурах до 1100°C [1]. Импульсная пластическая деформация при ЦТСВ, пиковый рост температуры и давления приводят к

ускорению диффузионных процессов, что вызывает быстрое разупрочнение металла. В таких условиях многие типы жаропрочных никелевых и кобальтовых суперсплавов являются недостаточно эффективными [2].

Новые типы легких экономно-легированных жаропрочных сплавов на основе алюминида никеля выгодно отличаются от известных материалов более высокими технологическими и эксплуатационными свойствами при рабочих температурах. Такие сплавы в отдельных случаях доведены до промышленного применения [3] и содержат легирующие элементы с различной температурой плавления, такие как Al (660°C), Ni (1453°C), W (3410°C), Ta (3000°C), Mo (2610°C). Получить в наплавленном виде подобные сплавы можно с помощью композиционного наплавочного стержня, состоящего из металлической оболочки и наполнителя, в котором туго- и легко-

плавкие компоненты содержатся в стехиометрическом соотношении относительно Ni и Al в виде металлических порошков и проволок. Однако эффективность применения такого материала при обычных процессах ЭШН невелика из-за неравномерного расплавления компонентов наплавочного материала в низкотемпературном шлаке, что не позволяет получать качественный наплавленный металл [1,4,6].

С целью повышения качества расплавления композиционного стержня в данной работе исследованы теплофизические особенности нового процесса ЭШН в СК с дополнительным полым графитовым электродом, размещенным в центре шлаковой ванны.

Методика эксперимента

Условия ЭШН моделировали в секционном кристаллизаторе с полым электродом диаметром 12 мм, имеющим конус на торце, при различных способах подвода электротока к шлаку. Шлаковую ванну имитировал раствор электролита, вязкость которого (0,03 Па·с) примерно соответствует вязкости перегретого шлака (флюс АНФ-6). Материалом для модели кристаллизатора служили три медных кольца диаметром 50 мм и толщиной 2,5 мм, которые помещали в стеклянную полость цилиндрической формы (рис.1). Кольцо токоведущей секции имело вертикальный разрез. В качестве изделия использовали цилиндр из меди М1 диаметром 20 мм и высотой 7 мм.

Во всех случаях на токоведущую секцию модельного кристаллизатора подавали напряжение 36 В, а на полый электрод — 28 В от независимых источников постоянного напряжения. После погружения полого электрода в электролит на глубину конуса на его торце визуально фиксировали движение раствора на поверхности и в объеме электролитической ванны, для чего электролит подкрашивали графитовой крошкой. В малом объеме модельной ванны сложно зафиксировать стационарные потоки электролита, однако в течение первых 8-10 с сделать это вполне возможно. Направление движения шлака, учитывая [7], можно определить по направлению объемной электромагнитной силы f_e . Распределение линий тока, влияющее на характер течения шлака и определяющее тепловую ситуацию в нем, в модельной схеме устанавливали на основе данных работ [5,6,8], полученных для разных случаев подвода тока к кристаллизатору.

Экспериментальные наплавки проводили по разработанной в результате моделирования процесса

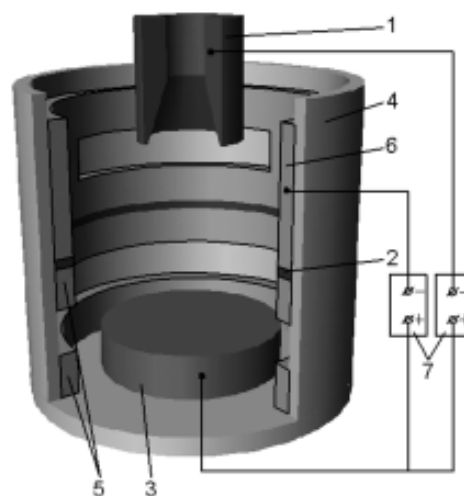


Рис.1. Физическая модель секционного кристаллизатора с дополнительным электродом. 1 — полый графитовый электрод; 2 — изолятор; 3 — изделие; 4 — стеклянная полость; 5 — формирующая секция; 6 — токоведущая секция; 7 — источники питания постоянного тока.

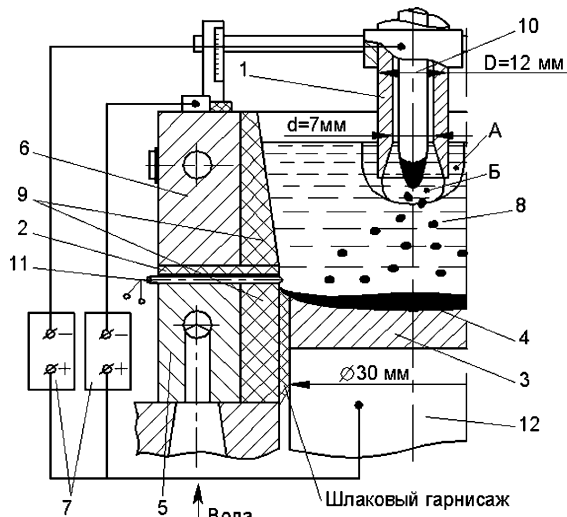


Рис.2. Схема ЭШН в СК с полым графитовым электродом. 1, 2, 5, 6, 7 — то же, что на рис.1; 3 — наплавленный металл; 4 — металлическая ванна; 8 — шлаковая ванна; 9 — графитовая вставка; 10 — композиционный стержень; 11 — термопара; 12 — изделие.

ЭШН схеме (рис.2). В качестве наплавочного материала использовали композиционный стержень диаметром 5 мм, состоящий из оболочки (никель НП2), в полость которой помещали порошки алюминия, циркония, борида молибдена, графита и проволоки из технически чистых вольфрама, тантала, молибдена и Нп-Х20Н80Т. Введение проволок из тугоплавких компонентов предпочтительней, чем металлических порошков, так как исключает сепарацию легких и тяжелых фракций в шихте. Состав

композиционного стержня рассчитывали исходя из химического состава известного сплава [9], содержащего никель и алюминий в стехиометрическом соотношении, для получения матрицы наплавленного металла на основе интерметаллида Ni_3Al . Содержание других легирующих элементов в шихте составляло (масс.%): W — 2,5-3,0; Ta — 0,5-2,5; Mo — 2,5-3,0; Zr — 0,5-2,5; Cr — 4,4; В — 0,035. Графитовый порошок вводили в шихту стержня с учетом количества углерода, переходящего в шлак в результате электрохимического растворения рабочей части полого электрода. Масса наплавленного на заготовку из стали 40Х металла составляла 40 г. Скорость расплавления каждого проволоочного компонента композиционного стержня оценивали по количеству металла, расплавляемого в единицу времени. Оптимальный режим ЭШН композиционного стержня соответствовал режиму наплавки, при котором разница в скорости расплавления его компонентов была минимальной.

ЭШН проводили на постоянном токе прямой полярности с использованием источников питания ВДУ-504 и ВДУ-1000 на флюсе АНФ-6. В процессе наплавки ток $I_{ск}$ на шлаке с токоведущей секции СК и ток $I_э$ с полого электрода изменяли в диапазоне 140-250 А при соответствующем изменении напряжения на шлаке в диапазоне 17-23 В. Высоту шлаковой ванны поддерживали в пределах 25-30 мм, а для ее защиты от атмосферы использовали аргон. Температуру шлака регистрировали с помощью вольфрам-рениевых термопар марки ВР 10/20 на многоканальном потенциометре КСП-4. Твердость наплавленного металла при нормальной и повышенной температурах определяли на приборе ТШ-2 методом вдавливания твердосплавного бериллизованного шарика диаметром 5 мм при нагрузке 7,35 кН в течение 10 с. Микроструктуру наплавленного металла исследовали на цифровом микроскопе Olympus VХ 61. Фазовый состав наплавленного металла определяли методами рентгеноструктурного анализа в медном излучении на дифрактометре ДРОН-3М.

Результаты и обсуждение

Исследования физической модели СК с полым электродом показали, что при введении в шлак полого электрода, имеющего малую активную поверхность в зоне погружения, энергетическая обстановка в шлаковой ванне существенно меняется (рис.3). Электрическое поле токоподводящей секции кристаллизатора вытесняет достаточно плотно расположенные линии тока с неплавящегося полого электрода в подэлектродный участок шлаковой ванны. Увели-

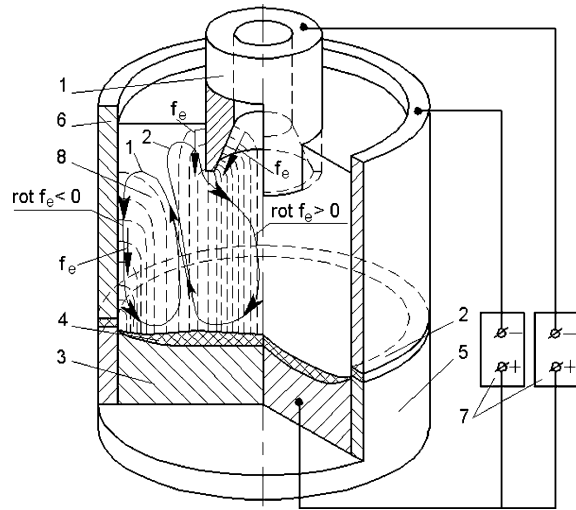


Рис.3. Распределение тока и движение шлака при ЭШН в СК с полым графитовым катодом. Обозначения 1-8 те же, что на рис.2.

чение плотности линий тока в области под электродом приводит к усиленному нагреву шлака в зоне погружения электрода, что вызывает появление температурного градиента в шлаковой ванне. Большая плотность линий тока вблизи внутренней поверхности конического торца электрода обеспечивает максимальную температуру шлака в этой области, что способствует равномерному расплавлению компонентов композиционного стержня и образованию однородного расплава металлических капель.

Высокая плотность линий тока в нижней части стенки токоведущей секции и у поверхности электрода позволяет также достичь максимального значения объемной электромагнитной силы, которая направлена вниз и вызывает вихревое движение электролита вблизи этих поверхностей. Таким образом, результирующее движение электролита в объеме модели будет состоять из двух потоков, направленных навстречу друг другу (рис.3). В небольшом объеме модельного СК наблюдается эффект сглаживания потоков за счет вращения электролита в горизонтальной плоскости в результате воздействия магнитного потока на электролит при изменении направления линий тока в разрезанной токоведущей секции, что необходимо учитывать при рассмотрении действительной картины течения шлака. Поток 1 электролита, для которого выполняется условие $rot f_e > 0$, при своем продвижении вдоль электрода к металлической ванне отдает ей часть тепла и далее поднимается в центр шлаковой ванны. В этой части ванны направления потоков 1 и 2 совпадают, вследствие чего на их границе создается результирующий поток, который подхватывает и

переносит металлические капли к стенкам кристаллизатора. При своем движении вдоль стенки СК поток 2, для которого $\text{rot} f'_e < 0$, нагревается в нижней части стенки токоведущей секции и охлаждается в верхней ее части, нагревая тем самым поверхность металлической ванны. Вследствие такого движения время пребывания металлических капель в шлаке увеличивается, что позволяет получать хорошо металлургически обработанный наплавленный металл.

При проведении экспериментальных наплавов было установлено, что основным фактором, влияющим на равномерность плавления компонентов композиционного стержня и устойчивость ЭШН, является отношение токов $I_{\text{СК}}/I_3 = k$. С увеличением k до 1,5 температура шлака в прилегающей к поверхности полого электрода области *A* (рис.2) повышается до температуры кипения (3500°C), что, однако, не нарушает стабильность процесса ЭШН. Нарушение процесса ЭШН наблюдается при дальнейшем увеличении k , когда происходит закипание всей шлаковой ванны и ее выплескивание из кристаллизатора. При $k < 1,0$ температура шлака в области *A* снижается до величины, сравнимой с температурой шлаковой ванны в СК ($\sim 2000^\circ\text{C}$). В этом случае шлак нагревается преимущественно в конусообразной полости электрода, где его максимальная температура также приближается к температуре кипения.

Таким образом, проведение процесса наплавки при значениях k в интервале 1,0-1,5 обеспечивает устойчивое существование высокотемпературной области расплава шлака в зонах *A* и *B*. При значениях $k < 1$ высокотемпературная область в шлаке располагается в зоне *B*. Следует отметить, что установленные соотношения справедливы при значениях токов $I_{\text{СК}}$ и I_3 в интервалах от 140 до 250 А, тогда как при больших токах процесс ЭШН в малогабаритном СК становится неустойчивым. Исследованные режимы ЭШН обеспечивают скорость расплавления композиционного стержня V_c от 4,8 до 8 мм/с (рис.4), при которой происходит капельный перенос расплава, что является необходимым условием получения качественного наплавленного металла.

Для сравнения тепловых режимов работы СК по традиционной технологии [1] и по разработанному процессу был проведен расчет теплового баланса. В отличие от [10], при этом предполагалось, что распределение тепла в шлаке определяется действием двух независимых источников нагрева. Анализ полученных результатов (рис.5) показывает, что при рассматриваемой схеме ЭШН расход тепла на нагрев и плавление основного металла почти такой же, как и при традиционной схеме процесса, но при этом

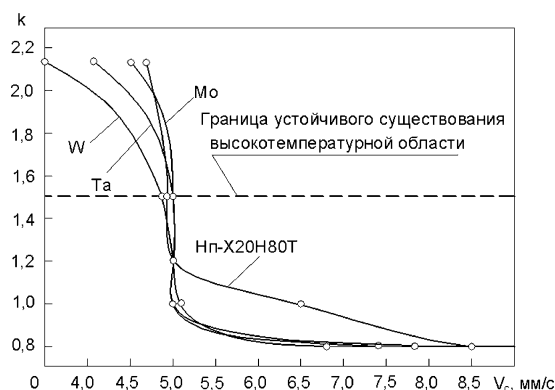


Рис.4. Влияние отношения токов на электродах $k=I_{\text{СК}}/I_3$ на равномерность плавления проволочных компонентов композиционного стержня.

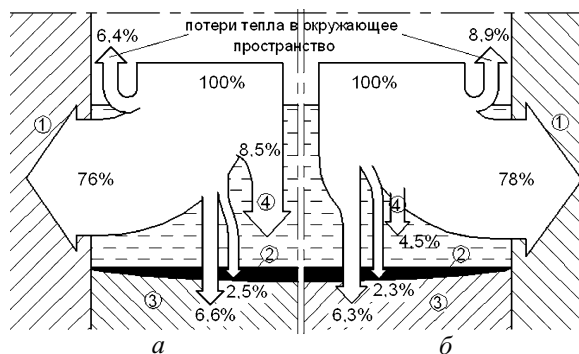


Рис.5. Диаграмма теплового баланса ЭШН в СК: *a* — с полым электродом; *b* — по традиционной технологии. 1 — кристаллизатор; 2 — металлическая ванна; 3 — заготовка; 4 — композиционный стержень.

расход тепла на нагрев и плавление композиционного стержня почти в два раза больше. Это связано с высоким температурным градиентом в шлаке в зоне погружения электрода, что усиливает приход тепла в наплавочный материал и позволяет более эффективно расходовать теплоту шлаковой ванны. Большие и одинаковые в обоих случаях потери тепла в кристаллизатор связаны с тем, что шлаковая ванна соприкасается с ним на 70% своей поверхности.

Было установлено, что наплавленный металл с оптимальным содержанием Та и Zr (до 2 масс.%) W и Mo (до 3 масс.%) отлично растекается на стальной подложке, хорошо формируется в основном шлаке и обладает качественной бездефектной поверхностью. Его твердость в нормальных условиях составляет около 4000 МПа, а при высоких температурах превышает твердость лучших наплавочных сплавов на основе никеля и кобальта (рис.6). Металлографические исследования показали, что наплавленный металл имеет направленное дендритообразное строение (рис.7а), не содержит сварочных

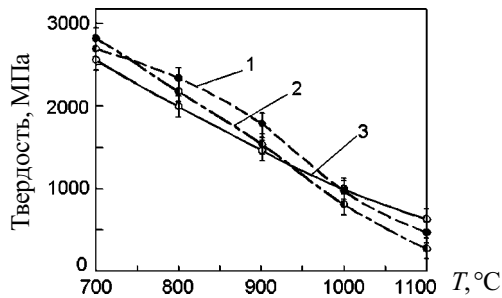


Рис. 6. Температурная зависимость твердости наплавленного металла. Материал наплавки: 1 — 50X20H65B4M4Ю6Ц; 2 — 250X29K55B12H1СГ; 3 — композиционный наплавленный металл на основе интерметаллида Ni_3Al .

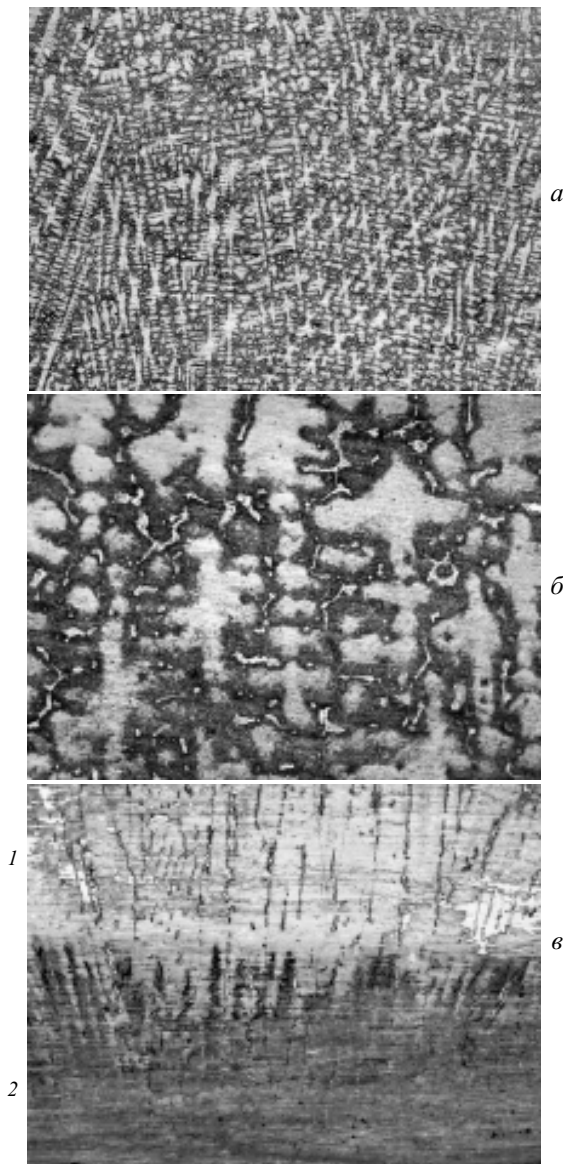


Рис. 7. Микроструктура композиционного наплавленного металла на основе интерметаллида Ni_3Al (а — $\times 100$; б — $\times 500$) и зоны сплавления (в — $\times 500$). 1 — наплавка, 2 — сталь.

дефектов и состоит из сложной гетерофазной структуры, основной составляющей которой является алюминид никеля Ni_3Al . Имеется также небольшое количество неупорядоченного твердого раствора алюминия в никеле (γ -фаза), монокарбиды тантала, молибдена, вольфрама и карбид хрома Cr_7C_3 . Кроме того, наблюдается большое количество сложного интерметаллида — χ -фазы, — в состав которой входит Cr, Mo, Ta. Суммарное содержание интерметаллидных фаз в структуре наплавленного металла составляет около 80% (рис. 7б).

В зоне сплавления наплавленного металла с подложкой нет дефектов и опасных кристаллизационных и диффузионных прослоек, влияющих на служебные свойства наплавленного изделия (рис. 7в). Ширина переходной зоны с переменной структурой между основным и наплавленным металлами не превышает 30-50 мкм. После испытаний на термическую усталость (100 циклов нагрева до $1000^\circ C$ и охлаждения в воде до $100^\circ C$) трещин в зоне сплавления не обнаружено.

Выводы

1. При введении полого электрода в шлаковую ванну малогабаритного секционного кристаллизатора температура области, прилегающей к поверхности электрода, повышается до температуры кипения шлака.

2. Появление высокотемпературной области в шлаковой ванне обеспечивает равномерное расплавление туго- и легкоплавких компонентов наплавочных материалов с образованием однородного расплава металлических капель.

3. Движение результирующего теплового потока в шлаковой ванне позволяет увеличить время металлургической обработки металлических капель в перегретом шлаке.

4. Разработанный процесс электрошлаковой наплавки в секционном кристаллизаторе с полым электродом обеспечивает получение качественного жаропрочного наплавленного металла на основе алюминида никеля, пригодного для работы в условиях циклического температурно-силового воздействия при температурах до $1100^\circ C$.

Литература

1. Соколов Г.Н., Михеев А.Н., Павлов А.А. Электрошлаковая наплавка оправок прошивного стана в секционном кристаллизаторе. Сварочное производство, 2002, №6, с.31-34.

2. Каблов Е.Н., Бунтушкин В.П., Поварова К.Б. и др. Малолегированные легкие жаропрочные высокотемпературные материалы на основе интерметаллида Ni_3Al . *Металлы*, 1999, №1, с.58-65.
3. Скачков О.А. Перспективные жаростойкие и жаропрочные сплавы на основе интерметаллидов $NiAl$ и Ni_3Al . *Сталь*, 2002, №2, с.74-77.
4. Самсонов И.Г., Королев Н.В., Бармин Л.Н. Температурный режим при электрошлаковой наплавке порошковой проволокой. *Автоматич. сварка*, 1981, №1, с.34-38.
5. Дудко Д.А., Компан Я.Ю., Щербинин Э.В. К вопросу о физической природе движения расплава при электрошлаковом процессе. *Сварочное производство*, 1990, №6, с.38-39.
6. Томиленко С.В., Кусков Ю.М. Энергетические особенности электрошлакового процесса в токоподводящем кристаллизаторе. *Автоматич. сварка*, 1999, №2, с.51-53.
7. Волошкевич Г.З., Дудко Д.А., Суцук-Слюсаренко И.И., Лычко И.И. Исследование электрошлакового процесса с помощью кинофотосъемки через прозрачную среду. *Автоматич. сварка*, 1971, №2, с.15-17.
8. Соколов Г. Н., Лысак В. И., Зорин И. В., Цурихин С. Н. Исследование электрофизических и тепловых процессов при электрошлаковой наплавке в малогабаритном секционном кристаллизаторе. В сб. тр. Всеросс. научн.-технич. конф. "МАТИ — Сварка XXI века". 2004, с.81-83.
9. Бунтушкин В.П., Базылева О.А., Поварова К.Б., Казанская Н.К. Влияние структуры на механические свойства легированного интерметаллида Ni_3Al . *Металлы*, 1995, №3, с.33-41.
10. Ксендзык Г. В. Особенности тепловой работы токоподводящего кристаллизатора при электрошлаковой наплавке зернистым присадочным материалом. *Промышленная теплотехника*, 1982, №2, с.45-50.