



электрод — из стальной проволоки. Поскольку электрическая проводимость воды на несколько порядков ниже электрической проводимости металлов, то выбор рода металла для модели ванны и электрода значения не имеет. Для исключения электролитических явлений питание модели осуществлялось переменным током частотой в 1 кГц. На рис. 1 и 2 точками обозначены результаты моделирования после масштабирования для сопоставимости с расчетными кривыми, между представленными данными совпадение вполне удовлетворительное. Некоторое расхождение, наблюдаемое при незначительном заглублении электрода (см. рис. 1), можно объяснить влиянием мениска вследствие смачивания электрода.

Ввиду малой изученности и отсутствия достоверных данных в настоящей работе приэлектродные процессы на границе металл–шлак во внимание не принимались [5, 6]. Учет анодного и катодного падения напряжений качественно не меняет зависимости общего сопротивления шлаковой ванны от различных параметров процесса

ЭШС, выявление которых и является основной целью данного исследования.

Таким образом, определено, что при ЭШС проволочным электродом электрическая проводимость шлаковой ванны прямо пропорциональна заглублению электрода. Она почти не изменяется, если электрод расположен на расстоянии от стенки свариваемых деталей, больше его диаметра.

1. Омура Г., Вакабаяси М., Хосода Т. Анализ теплопередачи в процессе ЭШС // Электрошлаковый переплав: Материалы II Междунар. симп. по технологии электрошлакового переплава. — Киев: Наук. думка, 1973. — С. 180–202.
2. Томманни Ж. В., Край Д. А. Математическая модель ЭШП на постоянном токе // Там же. — 1973. — С. 221–231.
3. Говорков В. А. Электрические и магнитные поля. — М.: Энергия, 1968. — 488 с.
4. Гликман И. Я., Русин Ю. С. Расчет характеристик элементов цепей радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Сов. радио, 1976. — 160 с.
5. Электрошлаковая сварка и наплавка / Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1980. — 511 с.
6. Митчел А. Механизм выделения и распространения тепла в процессе ЭШП // Электрошлаковый переплав: Материалы II Междунар. симп. по технологии электрошлакового переплава. — М.: Металлургия, 1971. — С. 80–92.

Formulae and dependencies of electrical conductivity of the slag pool upon deepening and position of wire electrode in electroslag welding are given. Results of modelling of conductivity of the slag pool by using the electrolytic bath are given.

Поступила в редакцию 17.07.2009



ПО СТРАНИЦАМ ЖУРНАЛА «WELDING JOURNAL» 2009, № 3

Y. F. Gao, H. Zhang, Z. W. Mao

РЕГИСТРАЦИЯ НАКЛОНА СВАРОЧНОЙ ГОЛОВКИ
И СЛЕЖЕНИЕ ЗА КРИВОЛИНЕЙНЫМ УГЛОВЫМ ШВОМ

Важно отрегулировать наклон сварочной головки во время автоматического слежения за криволинейным соединением при дуговой сварке. Проведено исследование на обнаружение отклонения и наклона сварочной головки, базирующееся на использовании сварочного тока для управления за передвижением робота при выполнении криволинейных угловых швов. Предложен новый метод обнаружения отклонения и наклона сварочной головки, основанный на токах дуги, полученных от высокоскоростного вращающего датчика дуги. Он использует метод наименьших квадратов для регулировки токов дуги на плоскости в трех измерениях. Отклоне-

ние и наклон сварочной головки проектируются на две ортогональные плоскости, так что они могут быть рассоединены и, таким образом, рассчитываться отдельно. Разработана передвижная сварочная роботизированная система, состоящая из дифференцированного аппарата и поперечно скользящего манипулятора. Для управления колесами робота и горизонтальным ползуном при слежении криволинейного углового шва разработан регулятор с нечетким алгоритмом. Результаты эксперимента показывают, что обнаружение и регистрация ошибок наклона и отклонения сварочной головки приблизительно равны $\pm 7,85^\circ$ и $\pm 0,42$ мм.



В выводах отмечается, что в работе была обоснована динамическая модель вращающегося датчика дуги, определены параметры модели. Функция переноса от СТВД к току сварки показывает, что система чувствительности датчиков линейная. Создавая соответствующую плоскость в трех измерениях, проектировались отклонение и наклон сварочной головки на две ортогональные плоскости, так чтобы они

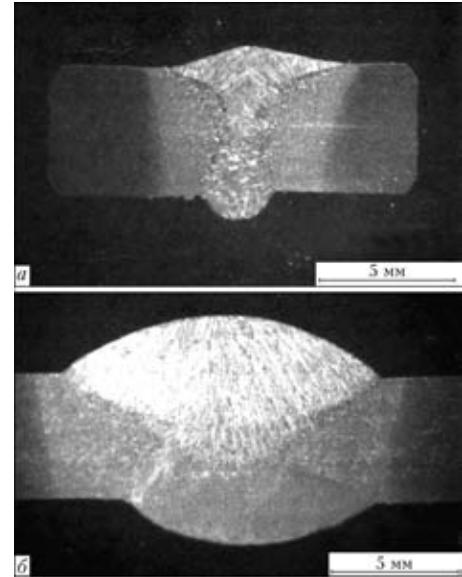
были рассоединены и могли быть рассчитаны отдельно. По сравнению с другими подходами разработанный метод может работать в масштабе реального времени и показывает высокий уровень точности обнаружения. Результаты экспериментов показали возможность и преимущества регулятора с нечетким алгоритмом на системе слежения за криволинейным угловым соединением.

S. M. Kelly, S. W. Brown, J. F. Tressler, R. P. Martukanitz, M. J. Ludwig
**ПРИМЕНЕНИЕ ГИБРИДНОЙ ЛАЗЕРНО-ДУГОВОЙ СВАРКИ
 ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ СУДОВЫХ ПАНЕЛЕЙ**

Гибридная лазерно-дуговая стыковая сварка успешно апробирована в условиях судостроительного завода при изготовлении стальных производственных панелей. Результаты этой технологии сравнивали с результатами применения технологии дуговой сварки под флюсом. Полученные значения деформации представлены в таблице. Оцененные расходы на выполнение гибридной лазерно-дуговой сваркой стыковых швов составляют 0,41\$/фт, а снижение себестоимости на снятие деформации — от 0,45 до 13,72\$/фт.

Дискретная деформация шва при производстве панелей

Измерения	Гибридная лазерно-дуговая сварка	Дуговая сварка под флюсом
Среднеквадратичное значение Δz	0,101 дюймов	0,396 дюймов
Диапазон ($\Delta z_{\max} - \Delta z_{\min}$)	0,874 дюймов	2,383 дюймов
Соответствие пластины MIL-STD-1689 определенным требованиям для первичной корпусной конструкции, %	96	75



Макроструктура поперечных сечений швов на стали ДН36 толщиной 0,197 дюйма (без скоса кромок), выполненных односторонней гибридной лазерно-дуговой сваркой (а) и двухсторонней дуговой сваркой под флюсом (б)

R. Rai, T. A. Palmer, J. M. Elmer, T. Debroy
**ПЕРЕНОС ТЕПЛА И ЖИДКОТЕКУЧЕСТЬ МЕТАЛЛА ШВА
 НА НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 304L ПРИ ЭЛС**

Цифровая модель для трехмерного переноса тепла и растекания жидкости в парогазовом канале при ЭЛС разработана и применена для швов из нержавеющей стали 304L, полученных при разных распределениях плотности энергии, достигнутых при изменении радиуса фокусного пятна при фиксированном тепловложении. Сначала в модели рассчитывалась геометрия парогазового канала, исходя из баланса энергии на стенках парогазового канала, а потом определялся трехмерное температурное поле и скорость растекания на изделии. Поскольку на баланс энергии и впоследствии на проплавление парогазового канала влияют температуры стенки парогазового канала, то рассмотрено варьирование температуры стенки парогазового канала с изменением глубины. Модифицированная модель турбулентности, основанная на гипотезе о смешанной длине Прандтля, использовалась для расчета пространственно изменяемых эффективных значений теплопроводности и вязкости при учете увеличенного нагрева и переноса массы благодаря турбулентности в

сварочной ванне. В отличие от моделей, существующих в литературе, предложенная модель учитывает физические процессы такие, как варьирование температур стенки парогазового канала с изменением глубины и результирующее влияние на расчет глубины канала и скоростей текучести вдоль стенки канала и трехмерное перемещение нагрева и массы. Таким образом, модель можно применять к материалам с большим диапазоном теплофизических свойств. Модель применялась для изучения характера текучести в сварочной ванне и ее влияния на геометрию шва. Рассчитанные размеры шва хорошо согласовывались с измеренными значениями. Расчет числа Пекле показал, что конвективный перенос тепла был крайне важен. Влияние конвекции было проиллюстрировано методом сравнения рассчитанной геометрии сварочной ванны в присутствии и отсутствии конвекции. Давление пара и температура стенки в парогазовом канале повышались с увеличением максимальной плотности энергии.



F. F. Nolcker, J. N. Dupont
**МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН
В ОБЛАСТИ ПРОВАЛА ПЛАСТИЧНОСТИ В СПЛАВАХ
НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ. Ч. 2**

Во второй из двух статей (первая опубликована в W. J. № 2, 2009) исследовано микроструктурное и микрохимическое поведение высоконикелевого сплава 600 (A600) и 690 (A690), присадочного материала 82Н (FM82Н) и 52 (FM52) во время термического цикла сварки и проведено сравнение с данными по горячей пластичности, представленными в первой статье. Для того чтобы подвергнуть эти четыре сплава действию моделированного теплового цикла шва использовали испытание на горячую пластичность на установке «Gleeble». Закалку водой выполняли при определенных температурах таким образом, чтобы микроструктура повышенной температуры могла быть соответственно охарактеризована. Микроструктурная и микрохимическая характеристики были получены при использовании сканирующей электронной микроскопии, методик аналитической электронной микроскопии. Полное растворение межзеренных карбидов наблюдалось в А690 и FM52 при температуре около 2400 °F (1316 °C). Оба сплава демонстрируют пластичность при охлаждении минимум до 1600 °F (871 °C). Из всех четырех сплавов наивысшая устойчивость к растрескиванию в области провала пластичности (DDC) наблюдалась у А600 и А690 при нагреве и сопровождалась выделением крупнозернистых, однородно распределенных межзеренных карбидов. FM82Н, в которой сформировались межзеренные карбиды NbC, обладал наиболее стабильной межзеренной микроструктурой и пилообразными границами зерна, что соответствовало общей наилучшей устойчивости к DDC. Модификации различного цикла, которые привели к образованию увеличенного слоя межзеренных карбидов в FM82Н и FM52, также сократили склонность к DDC.

В заключении отмечается, что склонность к DDC (растрескивание в области провала пластичности сплавов) А600, А690, FM82Н и FM52 определена при испытании горячей пластичности на установке «Gleeble» и сопоставлена с оценкой микроструктуры этих сплавов во время первого термического цикла сварки. Из этого исследования можно сделать ряд выводов.

1. Не было найдено доказательств сегрегации серы или фосфора в образцах FM52, закаленных в воде, при минималь-

ной температуре пластичности, охлаждения 1600 °F (871 °C), нагрева 1600 °F или после 60 с изотермической выдержки при 1600 °F. Основываясь на этом, влияние серы и фосфора проявляется на DDC во время первого цикла, хотя, они скорее всего будут усиливать DDC, если присутствуют в больших концентрациях.

2. В испытанном диапазоне размер зерна не имеет значения для DDC рассмотренных сплавов. Размер зерна FM52 был в 2,5 раза больше, чем то же в А690, но оба демонстрировали пластичность при минимальном 1600 °F (871 °C) охлаждении. И наоборот, размеры зерна А600 и А690 при аналогичной температуре были такими же, в пределах экспериментальной погрешности, но провал пластичности в А600 отсутствовал.

3. Растворение межзеренных карбидов наблюдалось в А600, А690 и FM52 при пиковой части температуры теплового цикла. Такое растворение предшествует сокращению пластичности и увеличению склонности к DDC в промежуточном температурном интервале [1725...1475 °F (941...802 °C) охлаждения] во всех трех сплавах. Такое уменьшение размера межзеренного карбида и объемной доли приводит к ускорению сдвига границы зерна.

4. Охлаждение FM82Н и FM52 от пиковых температур, что соответствует растворению в них карбидов, привело к увеличению слоя межзеренных карбидов. Аналогично изотермическая выдержка при 1600 °F (871 °C) (минимум пластичности для А690 и FM52) привела к большему количеству межзеренных карбидов в FM82Н и FM52. Увеличенный слой межзеренных карбидов сокращает склонность к DDC независимо от типа карбида. Такое увеличение размера межзеренных карбидов и объемной доли будет способствовать сдвигу границы зерна.

5. Как оказалось, растрескивание провала пластичности в этих сплавах вызвано GBS, что может быть усилено посредством сильно локализованных напряжений. Эти напряжения могут образовываться вдоль границы раздела матрица/осадок, когда $M_{23}C_6$ карбиды образуются при аналогичном режиме температура/время, как при испытании на провал пластичности.