



УДК 621.791.75.037

АДЕКВАТНОСТЬ ТЕРМОГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СКВОЗНОГО ПРОПЛАВЛЕНИЯ ПРИ ТИГ И А-ТИГ СВАРКЕ НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА NIMONIC-75*

Д. В. КОВАЛЕНКО¹, инж., Д. А. ПАВЛЯК², инж., В. А. СУДНИК², д-р техн. наук, И. В. КОВАЛЕНКО¹, инж.
(¹ Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины; ² Тульский гос. ун-т, РФ)

Представлены результаты экспериментов по формированию шва при сварке ТИГ и А-ТИГ сплава Nimonic-75 и компьютерной имитации влияния конвекции расплава на форму шва в виде «песочных часов». Эксперименты выполнены с применением активирующего флюса PATIG Nim-75-A и без него на пластинах толщиной 3,15 мм. Адекватность модели оценивали путем сопоставления размеров реальных и имитационных шлифов. Проанализированы причины рециркуляционных течений. Выявлено совпадение экспериментальных и расчетных данных.

Ключевые слова: сварка ТИГ и А-ТИГ, никелевый сплав, проплавление, математическая модель, адекватность математической модели

Положительные результаты, связанные с резким увеличением глубины проплавления при нанесении активирующего флюса на поверхность свариваемого металла при сварке ТИГ (способ А-ТИГ) титана, полученные в Институте электросварки им. Е. О. Патона [1, 2], стимулировали исследования по контрагированию столба дуги при сварке ТИГ сталей и других материалов [3–5].

Начало исследованиям конвекции при сварке положила работа [6], посвященная влиянию поверхностно-активных веществ на глубину проплавления. В работе [7] экспериментально подтверждены положения [6] о ключевом факторе глубины проплавления — изменении знака температурного коэффициента поверхностного натяжения $d\sigma/dT$ с отрицательного на положительный. Введение поверхностно-активных веществ понижает поверхностное натяжение при температуре плавления, а значения коэффициента $d\sigma/dT$ становятся положительными. Но при повышении температуры до 1900 °С поверхностное натяжение достигает значений, характерных для чистого металла с максимумом при критической температуре, а значения коэффициента $d\sigma/dT$ снова становятся отрицательными, как и для чистого металла.

Первая в мире двумерная модель конвекции сварочной ванны [8], созданная в 1983 г., теоретически подтвердила положения работы [6] и показала, что силы поверхностного натяжения Ма-

рангони являются доминирующими и вместе с электромагнитными силами Лоренца — ответственными за появление двойных вихревых областей. Позднее установлено [9], что знак термоконцентрационной зависимости поверхностного натяжения и его значения определяют направление конвективного теплопереноса под дугу и количество вихрей. Моделирование роли электромагнитных сил в процессе сварки А-ТИГ продолжается, и до сих пор не определена природа механизма этого явления. Установлено, что сжатие дуги не влияет на проплавление аустенитных сталей, но должно учитываться как вспомогательный фактор [10, 11]. При этом доказано, что электромагнитная конвекция способствует глубокому проплавлению [12] и центростремительная составляющая электромагнитной силы является доминирующим фактором проплавления [13]. Опубликованные результаты представлены только для простейшего осесимметричного случая стационарного источника тепла несквозного проплавления на неподвижном изделии из аустенитной стали.

Технология сварки А-ТИГ никелевого сплава Nimonic-75 впервые была опробована в ИЭС им. Е. О. Патона [14]. Она основана на использовании короткой (1,5 мм) дуги и активирующего флюса PATIG Nim-75-A, содержащего фториды и оксиды металлов. Фториды способствуют контракции дуги [5] и влияют на развитие в ней физических процессов [15, 16]. С помощью фторидных флюсов можно сваривать титановые листы толщиной до 8 мм [17, 18]. Коллективом ученых во главе с Б. Е. Патонам [19] разработана теоретическая модель контракции дуги фторидными флюсами. Так, для фторида натрия NaF на сварочном токе $I_{св} = 100$ А получено значение радиуса анодного пятна $r_a \approx 1,5$ мм.

* Публикуется по материалам доклада, представленного на V Международной конференции «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных технологиях» (25–28 мая 2010 г., пос. Кацивели, Крым).



Рис. 1. Макрошлифы поперечных сечений швов с полным проплавлением, выполненных на сплаве Nimonic-75 сваркой А-ТИГ на $I_{св} = 100$ А (а) и сваркой ТИГ на $I_{св} = 180$ А (б) при одинаковой (200 мм/мин) скорости сварки

Другой никелевый сплав Nimonic-263 сваривали по слою отдельных оксидов титана и их смесей, процесс сварки моделировали с помощью программы «PHOENICS» [20]. Результаты вычислений отличались от полученных экспериментальных данных.

В последнее время компьютерное моделирование становится основным методом научных исследований. Перед разработчиками программных кодов и экспериментаторами, использующими такие программы, стоит вопрос: как должна быть оценена ошибка результатов моделирования? Компьютерная имитация заканчивается прогнозом результата сварки, наиболее важной характеристикой прогноза является доверительный уровень. Согласно работе [2] ошибка прогноза представляется векторной суммой ошибок имитации и эксперимента с учетом нормального случайного распределения данных. Значимость несоответствия результатов имитации (прогноза) экспериментальным данным определяется по статистическим критериям, например, при сравнении дисперсий по критерию Фишера [21] или при неизвестной дисперсии (что часто имеет место на практике) по критерию Стьюдента [22].

Целью настоящей работы является сравнение экспериментальной формы шва, выполненного на сплаве Nimonic-75 сваркой ТИГ и А-ТИГ со сквозным проплавлением с имитационной формой, а также анализ влияния конвекции расплава на форму шва.

Экспериментальные исследования. Их проводили автоматической сваркой на весу стыковых соединений пластин из никелевого сплава Nimonic-75 толщиной 3,15 мм и размером 2005 20 мм. Химический состав исследуемого сплава согласно [23] следующий, мас. %: 0,14 С; 0,14 Si; 0,39 Mn; 21,0 Cr; 3,4 Fe; 0,28 Ti; 0,05 Cu; 0,001 S; 0,008 P; 0,0175 O; Ni — основа.

Использовали неплавящийся вольфрамовый электрод с 2 мас. % Th диаметром 2,1 мм, с углом

заточки 30° и притуплением 0,5...0,8 мм. В качестве защитного газа (расход 10 л/мин), а также для поддува (расход 2 л/мин) применяли аргон с содержанием примесей не более 0,1 мас. %. Сварку выполняли на сварочном источнике питания ВСВУ-315. Эксперименты проводили с применением аэрозольного активирующего флюса (активатора) PATIG Nim-75-A и без него на токе $I_{св} = 40...240$ А, длина дуги составляла 1...4 мм, скорость сварки $v_{св} = 50...500$ мм/мин.

В каждом опыте на поверхность пластины наносили равномерный слой активатора толщиной 80...100 мкм. В процессе экспериментов контролировали сварочный ток, напряжение на дуге и скорость сварки. После сварки изготавливали макрошлифы и производили замеры геометрических размеров швов и визуальную оценку качества их формирования.

На рис. 1 показаны поперечные сечения швов с полным проплавлением, выполненных на сплаве Nimonic-75 при одинаковой (200 мм/мин) скорости сварки на $I_{св} = 100$ (сварка А-ТИГ) и 180 А (сварка ТИГ). Как видно из рисунка, при сварке А-ТИГ для полного проплавления шва можно уменьшить сварочный ток и тепловложение почти в 2 раза по сравнению со сваркой ТИГ.

На рис. 2 представлены макрошлифы шва, выполненного сваркой А-ТИГ, которые вырезаны из разных мест образца из сплава Nimonic-75 по его длине — в начале (рис. 2, а), середине (рис. 2, б) и конце (рис. 2, в) ($I_{св} = 100$ А, напряжение на дуге $U_{д} = 10$ В, длина дуги 1,5 мм, $v_{св} = 200$ мм/мин). На рисунке хорошо виден разброс формы и размеров шва по его ширине, что вызвано некоторой нестабильностью формирования шва при сварке с полным проплавлением на весу.

Имитация процессов сварки. Термогидродинамическая модель сквозного проплавления, разработанная в ТулГУ, построена на основе уравнений энергии, движения Навье–Стокса и неразрывности с соответствующими граничными условиями, учитывающими особенности сварки ТИГ и А-ТИГ. Она использована для имитации рассматриваемых процессов.

Теплофизические свойства сплава Nimonic-75 изучены лишь при комнатной температуре [23]. Аналогом указанному сплаву в России является никелевый сплав ХН55ВМТКЮ, в США — Inconel-718 [24], в Германии — Nicrofer 2520-alloy 75 [25]. Температурные зависимости теплофизи-

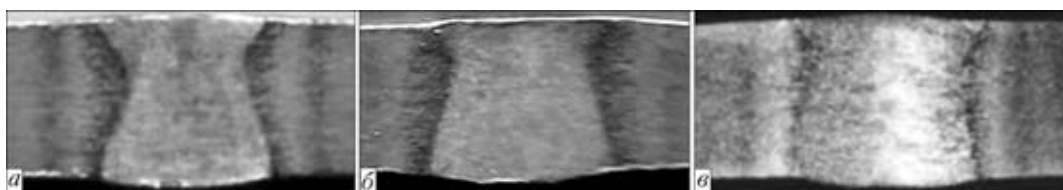


Рис. 2. Макрошлифы поперечного сечения шва, выполненного на сплаве Nimonic-75 сваркой А-ТИГ: а–в см. в тексте

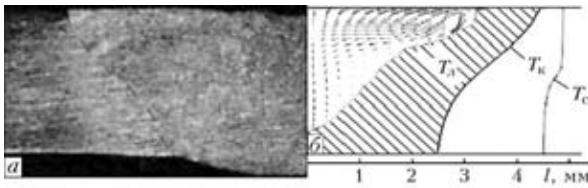


Рис. 3. Экспериментальное (а) и расчетное (б) сечение швов, выполненных сваркой ТИГ на $I_{св} = 180$ А

ческих свойств сплавов Inconel-718 и Nicrofer 2520-alloy 75 известны из работ [24, 25], их сравнение с реперными точками сплава Nimonic-75 показывает хорошее соответствие.

Для процесса сварки ТИГ принимали следующие исходные параметры режима: $I_{св} = 180$ А, $U = 9$ В, длина дуги 1,5 мм, КПД короткой дуги 94 %, $v_{св} = 200$ мм/мин, температурный коэффициент поверхностного натяжения $-0,017$ Н/(см·К) [24], радиусы электрического и теплового пятна соответственно 5,1 и 6,8 мм.

Расчетная максимальная температура сварочной ванны $T_{max} = 1780$ °С, расчетная ширина шва — 8,87 мм, экспериментальная — 10,5 мм, расчетная ширина проплавления — 5 мм, экспериментальная — 0...5 мм. Нестабильность ширины проплавления в эксперименте объясняется выбором режима в области перехода от неполного ($I_{св} = 170$ А) к сквозному ($I_{св} = 180$ А) проплавлению (рис. 3). Оценка положения границы проплавления может определяться принятой температурой плавления сплава (температурой ликвидуса $T_{л} = 1380$ °С) или когерентности (связности) $T_{к}$, при которой отсутствует жидкая фаза при температуре кипения 1367 °С, равной $T_{л} - (T_{л} - T_{с})/3$, где $T_{с}$ — температура солидуса [26]. На рис. 3, б эта область заштрихована.

Для процесса сварки А-ТИГ принимали следующие исходные параметры режима: $I_{св} = 100$ А, $U_{д} = 10$ В, длина дуги 1,5 мм, КПД короткой дуги 94 %, $v_{св} = 200$ мм/мин. С учетом особенностей этого процесса сварки принимали радиус теплового пятна 2,2 мм (из-за изоляционного действия активирующего флюса); радиус токового пятна 0,9 мм (из-за контракции дуги фтором); на верхней поверхности температурный коэффициент поверхностного натяжения $+0,01$ Н/(см·К) с учетом обратной конвекции Марангони; на нижней поверхности, где условия не изменялись, температурный коэффициент поверхностного натяжения составлял $-0,017$ Н/(см·К).

На рис. 4 показан трехмерный вид пластины из сплава Nimonic-75 при имитации процесса сварки А-ТИГ с необычной для дуговой сварки шириной и формой шва. Максимальная температура сварочной ванны $T_{max} = 2700$ °С хорошо соответствует современным представлениям о сварке неплавящимся электродом с учетом охлажда-

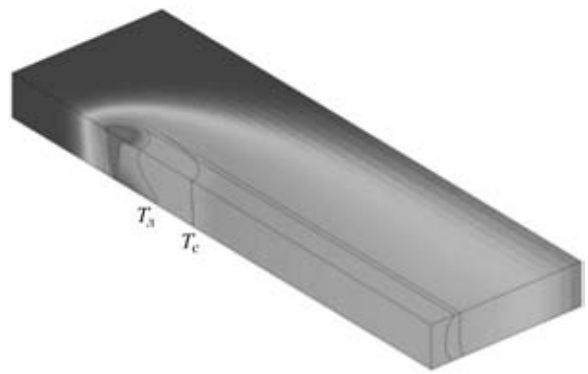


Рис. 4. Трехмерный вид пластины из сплава Nimonic-75 при имитации процесса сварки А-ТИГ

ющего действия процесса испарения, который учитывается в граничных условиях модели.

На рис. 5 приведены результаты расчета продольного сечения шва, выполненного сваркой А-ТИГ ($x = -12$ мм), которые свидетельствуют о хорошем воспроизведении формы шва в виде «песочных часов». Анализ полученных результатов показывает, что в сварочной ванне с двумя свободными поверхностями образуются две вихревые области с конвекцией Марангони. Причем у нижней поверхности сварочной ванны температурно-капиллярное течение Марангони имеет классический вид — от центра к краям сварочной ванны. На верхней же поверхности картина течения более сложная с элементами как прямой (от центра к краям сварочной ванны), так и обратной конвекции Марангони к центру сварочной ванны. Размеры поперечных сечений шва в виде «песочных часов» и картины течений в них в разных сечениях различаются. Для таких картин более целесообразно трехмерное объемное представление течений подобно тому, как это представлено в работе [26].

Предложенный возможный механизм сквозного проплавления при сварке А-ТИГ заключается в образовании следующих течений жидкого металла сварочной ванны: основного потока теплопереноса перегретого расплава по толщине листа в зоне контрагированной дуги, вызванного элект-

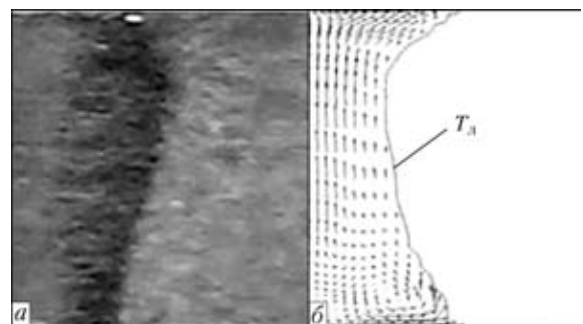


Рис. 5. Экспериментальное (а) и расчетное (б) сечение швов, выполненных сваркой А-ТИГ на $I_{св} = 100$ А; стрелками показано направление движения жидкого металла с максимальной скоростью 0,232 м/с



Таблица 1. Результаты экспериментов и расчетов, полученные по ширине швов, выполненных сваркой А-ТИГ и ТИГ на верхней W и нижней B поверхностях листа

Способ сварки	$I_{св}, A$	$v_{св}, мм/мин$	Ширина шва, мм					
			$W_{экс}$	$W_{мод}$	S	$B_{экс}$	$B_{мод}$	S
А-ТИГ	100	200	3,90	3,60	0,72	3,6	3,1	0,42
			3,80			4,1		
			3,30			3,4		
			Среднее 3,67			Среднее 3,7		
ТИГ	180	200	10,50	8,87	1,62	5,0	2,5	2,95
			10,00			4,6		
			9,00			3,6		
			Среднее 9,83			Среднее 4,4		

Примечания. 1. Здесь и в табл. 2 критерий Стьюдента $t_{m, 1-\alpha} = 4,3$. 2. Принимается условие адекватности. 3. Индексы «экс» и «мод» обозначают соответственно экспериментальное и модельное значения.

ромагнитными силами и определяющего ширину узкой горловины шва в виде «песочных часов», и двух дополнительных потоков рециркуляционных пограничных течений, вызванных термокапиллярными силами на обеих поверхностях сварочной ванны, которые определяют ширину расплавленных зон шва, уменьшающихся до размера горловины.

Адекватность математической модели. Под этим термином обычно понимают степень соответствия одноименных свойств объекта и модели. Процедура оценки адекватности компьютерной имитации процесса сварки А-ТИГ сплава Nimonic-75, характеризующегося проплавлением в форме «песочных часов» (см. рис. 5), и сварки ТИГ состояла в статистической обработке результатов эксперимента и получении оценки среднеквадратического отклонения S значений параметра (каждого из размеров ширины шва на верхней W и нижней B сторонах листа, а также ширины $W_{г}$ и высоты $H_{г}$ горловины «песочных часов»)

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (y_{экс} - y_{мод})^2},$$

где n — объем выборки; $y_{экс}$, $y_{мод}$ — соответственно экспериментальное и расчетное значения параметра.

Оценку адекватности производили по статистическому критерию Стьюдента

$$t_{m, 1-\alpha} \geq \frac{y_{экс} - y_{мод}}{S} \sqrt{n},$$

где $t_{m, 1-\alpha}$ — табличное значение t -распределения; α — уровень значимости, равный 0,05.

Результаты экспериментов и расчетов приведены в табл. 1 и 2.

Выдвинутые гипотезы совпадения средних значений двух совокупностей экспериментальной

и расчетной, оцененные по критерию Стьюдента, принимаются с доверительной вероятностью 0,95.

Таким образом, эксперименты по способу сварки А-ТИГ пластин из никелевого сплава Nimonic-75 толщиной 3,15 мм показали, что сварной шов при полном (сквозном) проплавлении принимает форму «песочных часов». Имитация с помощью термогидродинамической модели сварочной ванны процесса сварки А-ТИГ пластин из никелевого сплава Nimonic-75 воспроизводит форму полного (сквозного) проплавления в виде «песочных часов». Оценка точности воспроизведения размеров поперечного сечения шва данной моделью путем сравнения средних экспериментальных и расчетных значений по критерию Стьюдента показала, что адекватность данной модели с доверительной вероятностью 0,95. Предложенный механизм сквозного проплавления сварки А-ТИГ включает основной поток теплопереноса перегретого расплава по толщине листа в зоне контрагированной дуги, вызванный электромагнитными силами и определяющий ширину узкой горловины в виде «песочных часов», а также два дополнительных потока рециркуляционных пограничных течений, вызванных термокапиллярными силами на обеих поверхностях сварочной ванны и определяющих ширину распла-

Таблица 2. Результаты экспериментов и расчетов, полученных по ширине $W_{г}$ и высоте $H_{г}$ горловины шва в виде «песочных часов» при имитации процесса сварки А-ТИГ

$I_{св}, A$	$v_{св}, мм/мин$	Ширина горловины, мм			Высота горловины, мм		
		$W_{г\ экс}$	$W_{г\ мод}$	S	$H_{г\ экс}$	$H_{г\ мод}$	S
100	200	3,1	0,95	1,32	1,5	0,8	0,28
		3,0			1,2		
		2,4			0,9		
		Среднее 2,83			Среднее 1,2		



ленных зон шва, которые уменьшаются до размера горловины «песочных часов».

1. *Гуревич С. М., Замков В. Н., Кушиниренко Н. А.* Повышение эффективного проплавления при аргодуговой сварке // Автомат. сварка. — 1965. — № 9. — С. 1–4.
2. *Гуревич С. М., Замков В. Н.* Некоторые особенности сварки титана неплавящимся электродом с применением флюсов // Там же. — 1966. — № 12. — С. 12–16.
3. *Влияние* активирующих флюсов на проплавляющую способность сварочной дуги и концентрацию энергии в анодном пятне / О. Е. Островский, В. Н. Крюковский, Б. Б. Бук и др. // Свароч. пр-во. — 1977. — № 3. — С. 3–4.
4. *Савицкий М. М., Лесков Г. И.* Механизм влияния электроотрицательных элементов на проплавляющую способность дуги с вольфрамовым катодом // Автомат. сварка. — 1980. — № 9. — С. 17–22.
5. *Замков В. Н., Прилуцкий В. П.* Распределение плотности тока в анодном пятне при дуговой сварке титана // Там же. — 1987. — № 3. — С. 19–22.
6. *Heiple C. R., Roper J. R.* Mechanisms for minor element effects on GTA fusion zone geometry // Welding J. — 1982. — **61**, № 4. — P. 97–102.
7. *The surface tension of 304 and 316 type steels and their effects on weld penetration* / K. S. Mills, B. I. Keene, R. F. Brooks, A. Olusanya // Conf. «Centenary of metallurgy teaching». — Glasgow, 1984. — P. 1–11.
8. *Oreper G. M., Eagar T. W., Szekeley J.* Convection in arc weld pools // Welding J. — 1983. — **62**, № 11. — P. 307–312.
9. *Zhao Y.* The study of surface-active element oxygen on flow patterns and penetration in A-TIG welding // Metall. Mater. Trans. B. — 2006. — **37**, № 6. — P. 485–493.
10. *Tanaka M.* Effect of surface active elements on weld pool formation using TIG arcs // Welding Intern. — 2005. — **19**, № 11. — P. 870–876.
11. *Zhang R. H., Fan D.* Numerical simulation of effects of activating flux on flow patterns and weld penetration in A-TIG welding // Sci. Techn. of Welding and Joining. — 2007. — **12**, № 1. — P. 15–23.
12. *Wang Y., Shi O., Tsai H. L.* Modelling of the effects of surface-active elements on flow patterns and weld pool penetration // Metal. Mater. Trans. B. — 2001. — **32**, № 2. — P. 145–161.
13. *Experimental studies and mathematical modelling of metal penetration in TIG and A-TIG stationary arc welding* / K. A. Yushchenko, D. V. Kovalenko, I. V. Krivtsun et al. — S. I. [2008]. — 18 p. (Intern. Inst. of Welding; Doc. 212-1117-2008).
14. *A-TIG* сварка никелевого сплава НИМОНИК-75 / К. А. Ющенко, И. В. Коваленко, Д. В. Коваленко и др. // Сварщик. — 2000. — № 4. — С. 26–27.
15. *Lucas W., Howse D.* Activating flux — increasing the performance and productivity of the TIG and plasma processes // Welding & Metal Fabrication. — 1996. — **65**, № 1. — P. 11–17.
16. *Howse D., Lucas W.* Investigation into arc constriction by active fluxes for tungsten inert gas welding // Sci. and Techn. of Welding and Joining. — 2000. — **5**, № 3. — P. 189–193.
17. *Perry N., Marya S., Soutif E.* New perspectives of flux assisted GTA welding in titanium structures // Conf. proc. — S.I., 1999. — P. 55–62.
18. *Effect of flux containing fluorides on TIG welding process* / S. Leconte, P. Pillard, P. Chaelle et al. // Sci. and Techn. of Welding and Joining. — 2007. — **12**, № 2. — P. 120–126.
19. *Контракция* дуги флюсом при сварке вольфрамовым электродом в аргоне / Б. Е. Патон, В. Н. Замков, В. П. Прилуцкий, П. В. Порицкий // Автомат. сварка. — 2000. — № 1. — С. 3–9.
20. *Marangoni* convection and weld pool shape variation in A-TIG welding process / Y. L. Xu, Z. B. Dong, Y. H. Wei, C. L. Yang // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. — 2007. — **48**. — P. 178–186.
21. *Sudnik W., Radaj D., Erofeev W.* Validation of computerized simulation of welding processes // Mathematical-Modelling of weld phenomena 4. — London: IOM Communications, 1998. — P. 477–493.
22. *Ерофеев В. А., Карпунин Е. В., Судник В. А.* Компьютерная имитация нестационарной лазерной сварки. Компьютерные технологии в соединении материалов // Сб. науч. тр. 3-й Всерос. науч.-техн. конф., г. Тула, 9–11 окт. 2001 г. — ТулГУ, 2001. — С. 111–118.
23. *B5 HR 20-72.* Specification for nickel-chromium-titanium heat-resisting alloy plate, sheet and strip. — Великобритания.
24. *Numerical* modelling of the EBW process / V. A. Sudnik, V. A. Erofeev, K.-H. Richter, K.-U. Heins // Computer Techn. in Welding and Manufacturing. — Kiev: Paton Electric Welding Institute, 2006. — P. 295–300.
25. *Nicrofer 2520*-alloy 75. Material Data Sheet. — ThessenKrupp VDM. — № 4035.
26. *Unsteady* interfacial phenomena during inward weld pool flow with an active surface oxide / C. X. Zhao, V. van Steijn, L. M. Richardson et al. // Sci. and Techn. of Welding and Joining. — 2007. — **14**, № 2. — P. 132–140.

Results of experiments on weld formation in TIG and A-TIG welding of alloy Nimonic-75, and results of computer simulation of the effect on the «sand-glass» shaped weld by the melt convection are presented. The experiments were carried out with and without activating flux PATIG Nim-75-A on 3.15 mm thick plates. Adequacy of the model was evaluated by comparing sizes of the real and simulated weld sections. The causes of recirculation flows were analysed. Correlation of the experimental and computation data was revealed.

Поступила в редакцию 20.07.2010