

ОСОБЕННОСТИ МИКРОСТРУКТУРЫ МНОГОСЛОЙНЫХ ШВОВ С РАЗЛИЧНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ К ОБРАЗОВАНИЮ ГОРЯЧИХ ТРЕЩИН*

К.А. ЮЩЕНКО, Л.И. МАРКАШОВА, А.В. ЗВЯГИНЦЕВА, Ю.А. ХОХЛОВА,
О.С. КУШНАРЕВА, Н.О. ЧЕРВЯКОВ

ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В работе рассмотрены многослойные швы, выполненные проволокой Inconel 52, имеющие высокую чувствительность к образованию трещин провала пластичности (DDC) в зоне термического влияния (ЗТВ) и швы, выполненные проволокой Inconel 52MSS, которые оказались нечувствительными к образованию трещин данного типа при определенном уровне скоростей деформации. Исследовали изменения структурных характеристик швов, выполненных указанными проволоками, методами трансмиссионной микроскопии, микрорентгеноспектрального анализа, измерения микротвердости, а также с помощью дифракции отраженных электронов. Библиогр. 9, табл. 2, рис. 8.

Ключевые слова: многослойная наплавка, трещины провала пластичности, никелевые сплавы, плотность дислокаций, энергия дефекта упаковки, микротвердость

Прогнозирование и управление структурой и свойствами металлических материалов и сварных конструкций из них требуют многоуровневого иерархического подхода к твердому телу как к совокупности взаимосвязанных подсистем, таких как: электронная подсистема; кристаллическая решетка, структура которой определяется электронной подсистемой; подсистема дефектов кристаллической решетки; поверхностные слои; все внутренние поверхности раздела; отдельные фазовые подсистемы в сложных гетерогенных средах [1].

На современном этапе построение многоуровневой модели деформируемого твердого тела находится на активной стадии своего развития. При этом экспериментально исследуются основные характеристики отдельных подсистем, их функциональные взаимосвязи, закономерности их самосогласованного изменения в различных полях внешних воздействий (механических, тепловых, электрических, радиационных и др.).

В данной работе рассмотрены изменения структуры под действием сварочного цикла для многослойных наплавки, выполненных проволоками с различной чувствительностью к образованию горячих трещин.

Известна высокая чувствительность к образованию трещин провала пластичности (DDC) в сварных соединениях никелевых сплавов типа Inconel 690, согласно которой трещины формируются в температурном интервале около 700...1000 °С по большеугловым миграционным

границам аустенитных зерен преимущественно в многопроходных швах [2–4]. При этом механические испытания на установке «Ала-Тоо» (типа Gleeble) показывают различия в склонности к образованию провала пластичности. Так, сварные соединения, выполненные проволокой Inconel 52, имеют пониженные значения относительного удлинения δ в интервале температур 600...1000 °С в отличие от сварных соединений, выполненных проволокой Inconel 52MSS, у которых провал пластичности в соответствующем интервале температур незначителен [3].

В связи с возникающими проблемами, связанными с оценками свойств сварных соединений, предложены работы в плане моделирования условий сварки для многопроходных швов в сварных конструкциях, которые выполняли шестипроходными наплавками на пластины из сплава Inconel 690 размерами (6...8)×40×200 мм в предварительно выстроганные канавки.

Химический состав сварочных проволок и основного металла приведен в табл. 1.

Сам процесс автоматической сварки в разделку с использованием проволоки диаметром 0,9 мм выполняли неплавящимся электродом в среде аргона на режимах: $U_d = 10,5$ В; $v_{\text{подачи}} = 75$ м/ч; $f_{\text{колеб}} = 60$ колеб/мин; $A_{\text{колеб}} = 25$ мм; $v_{\text{св}} = 6$ м/ч, указанных на рис. 1.

В данных условиях выбранные режимы сварки обеспечивали оптимальное формирование каждого валика многослойного шва при отсутствии под-

*По материалам работы, выполненной в рамках целевой комплексной программы НАН Украины «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин» (2013–2015 рр.).

Таблица 1. Химический состав сварочных проволок и основного металла, мас. %

Марка сплава	C	Mn	Ni	Cr	Fe	Nb	Mo	Ti	S	P	Al	Si
In 690	0,025	0,24	Основа	29,72	10,3	-	-	0,28	0,002	0,005	0,87	0,32
In 52	0,026	0,31	"-	28,8	8,5	0,03	0,03	0,51	0,001	0,004	0,72	0,12
In 52MSS	0,024	0,29	"-	30,3	7,2	2,52	3,51	0,25	0,0008	0,0006	0,22	0,15

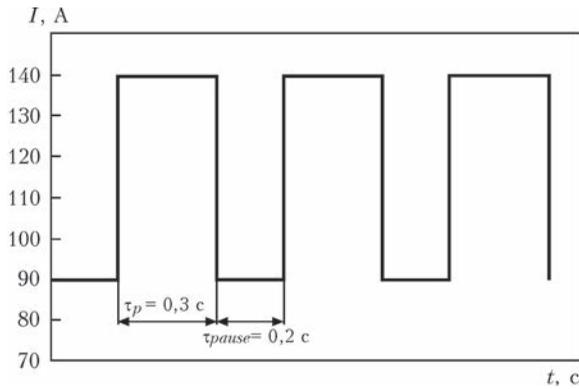


Рис. 1. Режимы автоматической сварки

резов и несплавлений между валиками и минимальном проплавлении предыдущего шва.

Для соответствующих испытаний на установке PVR-Test с переменной скоростью деформирования во время сварки в пределах 0...12 мм/мин из наплавленных пластин изготавливали образцы (строжка и шлифовка до размеров 340×180×3 мм). Методика и результаты испытаний описаны в работе [5].

В плане последующего анализа условий возникновения и характера распространении трещин DDC в сварном шве, выполненном проволоками Inconel 52MSS и Inconel 52, на первом этапе были проведены экспериментальные исследования зеренной структуры в ЗТВ сварного шва с помощью сканирующего растрового электронного микроскопа с использованием EDX и CCD-детектора. При этом методами EDX исследовали химическую неоднородность

родность ячеистой структуры металла швов Inconel 52MSS и, для сравнения, металла швов Inconel 52, нелегированных Mo и Nb (рис. 2, 3).

Исследованиями установлено, что в швах Inconel 52, в которых содержание Mo и Nb минимальное (общее содержание Mo и Nb составляет ~0,7 %), химическая неоднородность значительно меньше, что способствует образованию трещин провала пластичности. В то же время, в отдельных участках шва проволоки Inconel 52MSS содержание Nb и Mo увеличивается в ~ 2...4 раза по сравнению с общим содержанием (Mo и Nb порядка 6 %).

На следующем этапе исследований с целью изучения тонкой (дислокационной) структуры металла различных зон сварного соединения, в том числе и характера субструктуры, деталей межзеренных, субзеренных границ и других параметров структуры, использовали метод просвечивающей (трансмиссионной) электронной микроскопии. Прямые исследования тонкой структуры на просвет выполнены на установке JEM-200CX (фирмы «JEOL») при ускоряющем напряжении 200 кВ. В данном случае оценка скалярной плотности и характера распределения дислокаций (рис. 4) выполнялась с использованием метода секущих. При этом конкретные значения плотности дислокаций ρ определяли по зависимости:

$$\rho = \frac{M}{t} \left(\frac{n_1}{L_1} \div \frac{n_2}{L_2} \right), \quad (1)$$

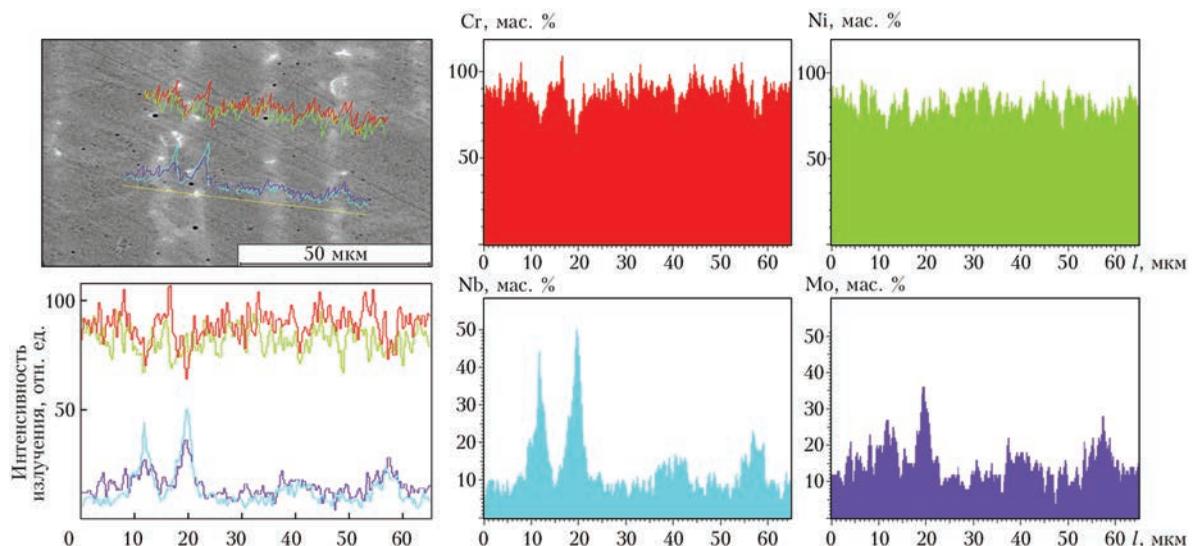


Рис. 2. Концентрационные изменения химических элементов (Cr, Ni, Nb, Mo) в исследуемых участках металла сварных швов, выполненных проволокой Inconel 52MSS в аргоне. Наблюдается химическая неоднородность по Nb и Mo

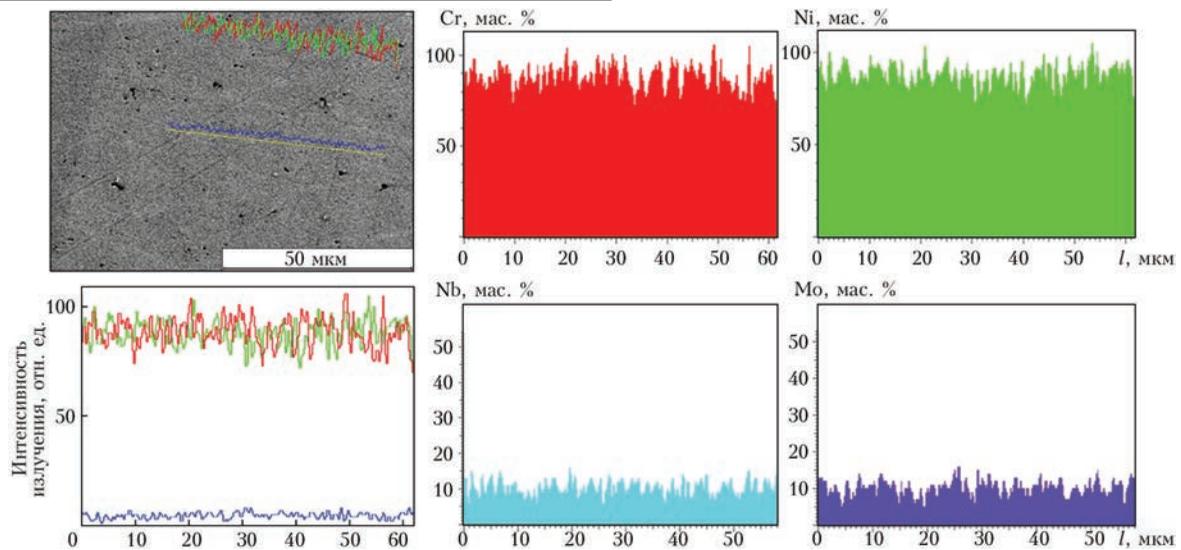


Рис. 3. Концентрационные изменения химических элементов (Cr, Ni, Nb, Mo) в исследуемых участках металла сварных швов, выполненных проволокой Inconel 52 в аргоне. Химическая неоднородность не наблюдается

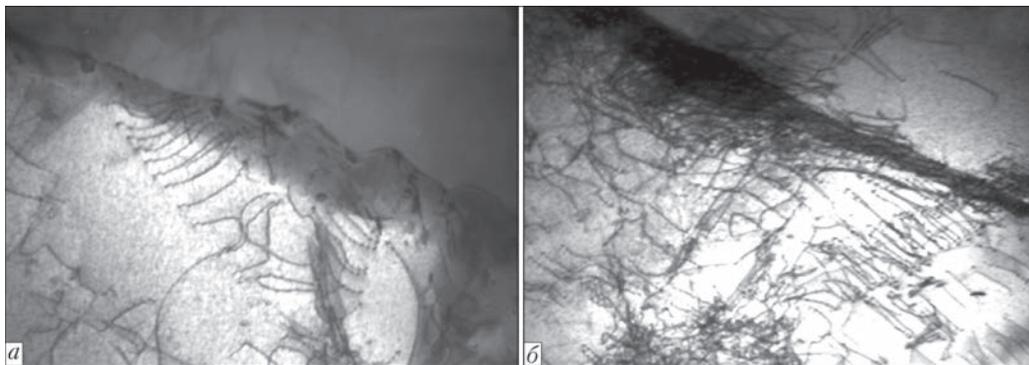


Рис. 4. Характер распределения дислокаций в металле шва: *a* — в сплаве Inconel 52 MSS (равномерное распределение с невысокой плотностью); *б* — в сплаве Inconel 52 (увеличение плотности дислокаций при градиентном ее распределении), $\times 30000$

где M, t — увеличение и толщина фольг; n_1, n_2 — число пересечений с горизонтальными и вертикальными линиями соответственно; L_1, L_2 — суммарная длина горизонтальных и вертикальных линий. Все результаты по оценке плотности дислокаций в металле шва (как при использовании проволоки Inconel 52 MSS, так и с Inconel 52) в разных участках структуры, а именно — во внутренних объемах зерна, вдоль межзеренных, а также субзеренных границ представлены в табл. 2.

Фазовый состав выделений, формирующихся в зоне сварки, определяли методами микродифракционного анализа.

Детальные исследования характера дислокационной структуры позволили выполнить также и оценку таких параметров дефектообразования, как энергия дефектов упаковки (ЭДУ), которая является показателем условий образования структурных дефектов и может характеризовать склонность исследуемого материала к образованию горячих трещин.

Значения энергии дефекта упаковки определяли в данном случае по ширине расщепления дислокаций, а ширину дефекта упаковки определяли прямым измерением на структурных изображениях,

полученных при исследовании тонкой структуры на просвет. Конкретные значения ЭДУ определяли согласно зависимости [6, 8]:

$$\gamma = \frac{\mu b^2(2 - \nu)}{8\pi d_0(1 - \nu)}, \quad (2)$$

где ν — коэффициент Пуассона; b — вектор Бюргера; γ — энергия дефекта упаковки; μ — модуль сдвига; d_0 — ширина расщепления дислокаций (расстояние между частичными дислокациями).

В результате исследований в данном направлении установлено, что в металле шва при использовании проволоки Inconel 52 MSS (в состоянии без трещин) ширина расщепления дислокаций

Таблица 2. Значения плотности дислокаций ρ во внутренних объемах зерен и вдоль межзеренных и субзеренных границ металла шва при использовании проволоки различного легирования

Участки структуры	Плотность дислокаций (ρ , см ⁻²)	
	Inconel 52 MSS	Inconel 52
Объем зерна	$10^8 \dots 10^9$	$2 \cdot 10^9 \dots 8 \cdot 10^{10}$
Субграница зерна	10^9	$9 \cdot 10^{10}$
Граница зерна	$(6 \dots 7) \cdot 10^9 \dots 10^{10}$	$10^{11} \dots 2,2 \cdot 10^{11}$ (редко $3 \cdot 10^{11}$)

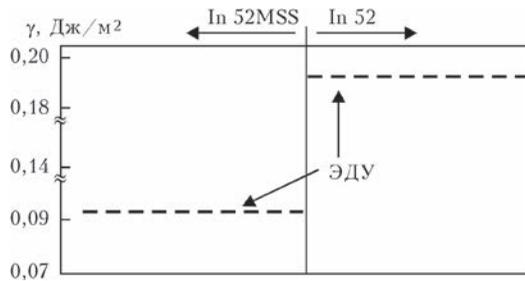


Рис. 5. Изменение энергии дефектов упаковки

(как в объеме зерен, так и у межзеренных границ) составляет 0,045...0,07 мкм (рис. 4, а), что соответствует значению энергии упаковки $\gamma_{ЭДУ}$ порядка $\sim 0,091 \text{ Дж/м}^2$ (рис. 5). Следует при этом отметить, что в данном металле шва повышенное содержание Мо (3,51 %) и Nb (2,51 %) снижает значение энергии дефектов упаковки, что и приводит к повышению трещиностойкости исследуемого металла.

Для более детального анализа характера распространения трещин DDC в сварном шве, выполненном проволоками Inconel 52MSS и Inconel 52, были проведены экспериментальные исследования зеренной структуры вблизи трещины в ЗТВ сварного шва

с помощью сканирующего растрового электронного микроскопа фирмы «Zeiss» EVO-50 с использованием CCD-детектора. Карты кристаллографической ориентации зерен (рис. 6) для каждого исследуемого образца свидетельствуют о том, что трещины провала пластичности в ЗТВ сварного соединения распространяются по большеугловым границам (рис. 7), что также подтверждается в работе [9].

Что же касается образцов, выполненных проволокой Inconel 52MSS, то в области ЗТВ образцов такого типа трещин не обнаружено. Дополнительными исследованиями субструктуры отмечено наличие по телу зерен большого количества малоугловых границ с разориентировкой фрагментов $2...4^\circ$. В швах Inconel 52 малоугловые границы практически отсутствуют. Статистические исследования мест распространения трещин провала пластичности в ЗТВ показали, что такого типа дефекты распространялись в основном по границам зерен с ориентацией преимущественно $\langle 111 \rangle$ и $\langle 101 \rangle$ либо по границам зерен с ориентацией $\langle 100 \rangle$.

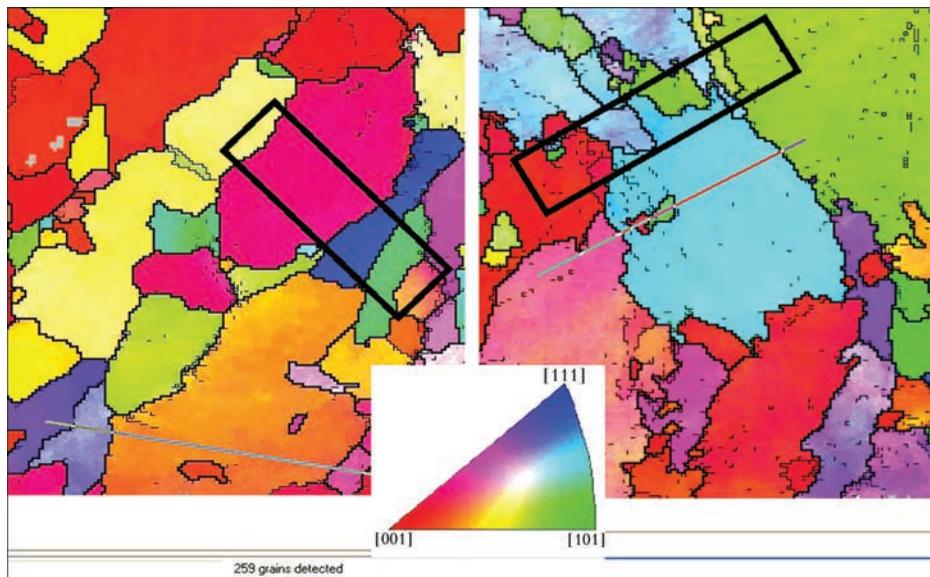


Рис. 6. Фрагменты ориентации кристаллитов (обратная полюсная фигура) металла ЗТВ сварных швов, выполненных проволоками Inconel 52 (а) и Inconel 52MSS (б). Прямоугольниками отмечены места, где проводилось измерение микротвердости

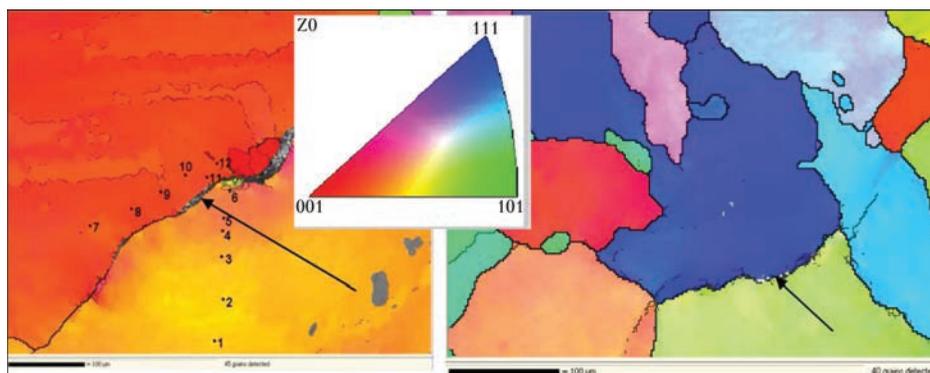


Рис. 7. Кристаллографическая картина расположения трещин в металле ЗТВ сварного соединения Inconel 52. Стрелками показаны трещины по границам зерен

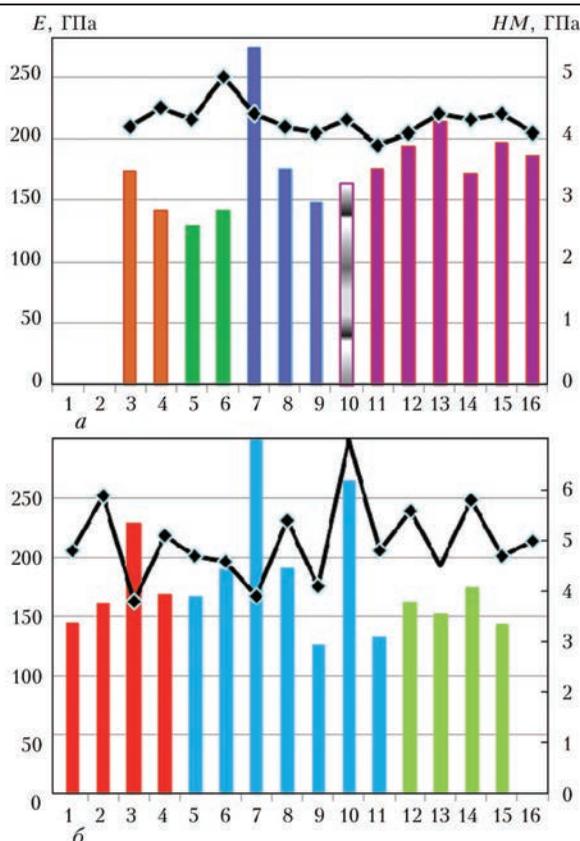


Рис. 8. Значения микротвердости HM , ГПа и модуля упругости E , ГПа для ЗТВ сварных соединений, выполненных проволоками Inconel 52 (а) и Inconel 52MSS (б)

Далее на зеренных структурах с известными кристаллографическими направлениями были измерены модули упругости и микротвердость. Цель эксперимента — изучение механических и кристаллографических изменений в процессе пластической деформации поликристаллического никелевого сплава и оценка локализации пластической деформации в пределах нескольких зерен методом микроиндентирования. При этом измерения микротвердости проводили на микроиндентометре Микрон-гамма с использованием нагрузки 5 и 10 г.

Результаты измерений показали значения микротвердости для Inconel 52 в пределах 2,8...5,5 ГПа, в то время как значения микротвердости для образца, выполненного проволокой Inconel 52MSS, имеют больший разброс значений — 2,9...7,0 ГПа (рис. 8).

Выводы

В результате исследований многослойных наплавов, выполненных проволоками с различной чувствительностью к образованию горячих трещин, показано, что микроструктурные составляющие и их изменения под действием сварочного термического цикла значительно влияют на стойкость

сварных соединений к образованию горячих трещин.

В швах Inconel 52, в которых содержание Mo и Nb минимально (общее содержание Mo + Nb = 0,7 %), химическая неоднородность существенно уменьшается, что способствует возникновению трещин DDC. В то же время в отдельных участках шва Inconel 52MSS, где содержание Nb и Mo возрастает в 2...4 раза по сравнению с общим содержанием (Mo + Nb = 6 %), трещины в швах данного типа отсутствуют.

Установлено, что тонкая структура металла швов при использовании проволоки Inconel 52 характеризуется более высокой плотностью дислокаций, особенно у границ зерен (порядка до $\rho \sim 10^{11} \dots 2,2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$).

Отсутствие трещин в металле шва в случае использования проволоки Inconel 52 MSS связано с равномерным (без градиентов) распределением плотности дислокаций, а также снижением значений энергии дефектов упаковки $\gamma_{ЭДУ}$ (до $\sim 0,091 \text{ Дж/м}^2$).

Трещины провала пластичности в ЗТВ сварных соединений распространяются, как правило, вдоль большеугловых границ зерен.

Результаты измерений микротвердости швов, выполненных проволокой Inconel 52, показали значения в пределах 2,8...5,5 ГПа, в то время как значения микротвердости для образца, выполненного проволокой Inconel 52MSS, имеют больший разброс — от 2,9 до 7,0 ГПа.

1. Панин В.Е., Егорушкин В.Е. Неравновесная термодинамика деформируемого твердого тела как многоуровневой системы. Корпускулярно-волновой дуализм пластического сдвига // Физическая мезомеханика. – 2008. – № 11. – С. 9–30.
2. *In situ* scanning electron microscopy high temperature deformation experiments to study ductility dip cracking of Ni–Cr–Fe alloys / E.A. Torres, F.G. Peternella, R. Caram, A.J. Ramirez // In-situ Studies with Phonons, Neutrons and Electrons Scattering; Ed. by T. Kannengiesser et al. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. – P. 28.
3. Comparative hot cracking evaluation of welded joints of alloy 690 using filler metals Inconel® 52 and 52 MSS / K. Yushchenko, V. Savchenko, N. Chervyakov et al. // Welding in the World. – 2011. – 55, № 9/10. – P. 28–35.
4. Lippold J.C., Kotecki D.J. Welding metallurgy and weldability of stainless steels, copyright // John Wiley&Sons. — 2005.
5. Исследование склонности к образованию трещин аустенитного материала с использованием методики PVR-Test / К.А. Ющенко, В.С. Савченко, Н.О. Червяков и др. // Автомат. сварка. – 2014. – № 6-7. – С. 13–16.
6. Электронная микроскопия тонких кристаллов / П. Хирш, А. Хови, Р. Николсон и др. – М.: Мир, 1968. – 574 с.
7. Томас Г. Электронная микроскопия металлов. – М.: Изд. Иностран. лит., 1963. – 351 с.
8. Горелик С.С., Ростаргуев Л.Н., Скаков Ю.А. Рентгенографический и электрооптический анализ. – М.: Металлургия, 1970. – 370 с.
9. Collins M.G., Ramirez A.I., Lippold J.C. An investigation of ductility-dip cracking in nickel-based weld metals-Part III // Welding J. – 2004. – № 2. – P. 39–49.

Поступила в редакцию 22.12.2015