

Ющенко К. А.
Маркашова Л. И.
Звягинцева А. В.
Савченко В. С.
Кушнарєва О. С.
Червяков Н. О.
*Институт
электросварки
им. Е. О. Патона
НАН Украины*
Yushchenko K. A.
Markashova L. I.
Zvyagintseva A. V.
Savchenko V. S.
Kushnaryova O. S.
Chervyakov N. O.
*E. O. Paton Electric
Welding Institute NASU*

УДК 621.791:669.6

СТРУКТУРНЫЕ АСПЕКТЫ И АНАЛИТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ ЛОКАЛЬНОГО ОХРУПЧИВАНИЯ СВАРНЫХ ШВОВ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

Комплексное исследование структуры металла шва никелевых сплавов In 52 и In 52MSS с последующей аналитической оценкой плотности дислокаций, значения локализованной деформации, локальных внутренних напряжений, энергии дефекта упаковки в различных областях структурных компонентов было сделано с помощью просвечивающей электронной микроскопии.

Ключевые слова: падение пластичности, никелевые сплавы, горячие трещины, многопроходные швы, тонкая структура.

Никелевые сплавы типа In 690 широко применяются в атомной промышленности, используется для производства труб парогенераторов, для компонентов термического оборудования. Однако, известна высокая чувствительность к образованию трещин провала пластичности (DDC) в сварных соединениях никелевых сплавов такого типа. Трещины формируются в температурном интервале около 700-1000°C по большеугловым миграционным границам аустенитных зерен преимущественно в многопроходных швах [1,2,3]. Механические испытания на установке Ала-Тоо типа Gleeble показали различия в склонности к образованию провала пластичности. Сварные соединения, выполненные проволокой In52, в отличие от сварных соединений, выполненных проволокой In52MSS, имеют пониженные значения относительного удлинения δ в интервале температур 600-1000 °C. В металле сварных швов Inconel 52MSS провал пластичности в соответствующем интервале температур незначителен [2].

Исследовали чувствительность к образованию трещин, выполненных в сварных соединениях никелевого сплава In690 проволоками In52 и In52MSS.

Для оценки свариваемости использовали разрушающие методы испытания с применением нагрузки в соответствии с ISO/TR 17641-3:2005 и ISO/TR 17641-1-2011.

Использовалась методика PVR-Test с программируемой деформацией (Programmierter Verformungs Riss Test) [4].

Для моделирования условий выполнения многопроходных швов в сварных конструкциях, проводили шестипроходные наплавки на пластины из сплава In690, размерами 6×8×40×200 мм в предварительно выстроганные канавки. Схема разделки кромок и порядок наложения швов приведен на схеме (рис. 1а). Химический состав сварочных проволок и основного металла приведены в таблице 1.

Автоматическую сварку в разделку с использованием проволоки 0,9 мм выполняли неплавящимся электродом в среде аргона на режимах: $I_{имп} = 140A$; $\tau_{имп} = 0,3с$; $I_{паузы} = 95A$; $\tau_{паузы} = 0,2с$; $U_d = 10,5В$; $v_{подачи} = 75м/ч$; $f_{колеб} = 60$ колеб/мин; $A_{колеб} = 25$ мм; $v_{св} = 6м/ч$. Выбранные режимы сварки обеспечивали хорошее формирование каждого валика многослойного шва, отсутствие подрезов и несплавлений между валиками, минимальное проплавление предыдущего шва.

Из наплавленных пластин изготавливали образцы (строжка и шлифовка до размеров 340×180 мм), которые испытывали на установке PVR-Test с переменной скоростью деформирования во время сварки в пределах 0÷12 мм/мин. Макроструктура образца после испытаний приведена на рис. 1 б.

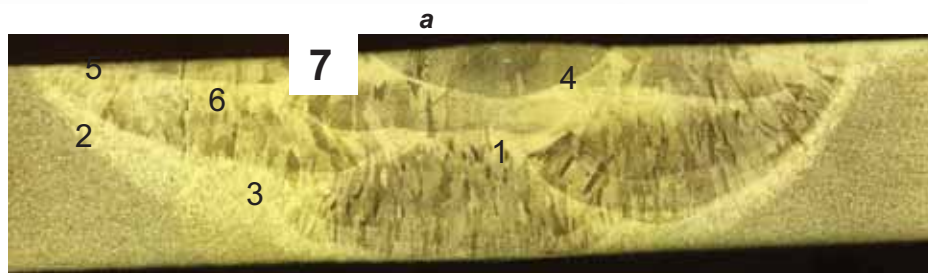
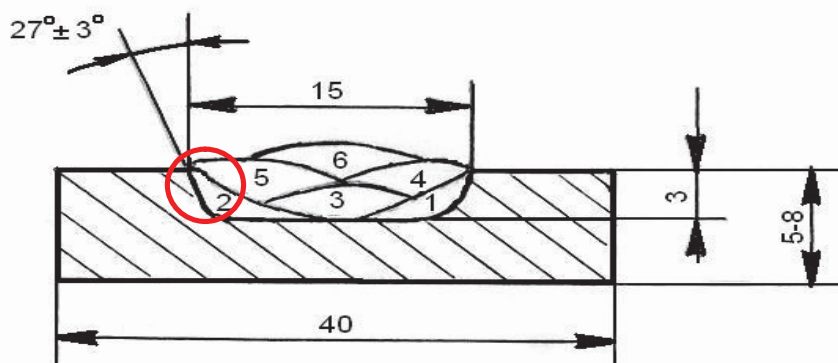


Рис. 1. Схема наложения швов проволоками In 52 либо In 52MSS (а), кругом показано место вырезки образцов для трансмиссионной микроскопии; макроструктура многослойной наплавки. (1-6) и контрольного шва TIG без присадки (7) на установке PVR-Test (б)

Таблица 1

Химический состав сварных проволок и основного металла

Марка сплава	Состав элементов, wt. %											
	C	Mn	Ni	Cr	Fe	Nb	Mo	Ti	S	P	Al	Si
In690	0.025	0,24	base	29.72	10.3	-	-	0.28	0.002	0.005	0.87	0.32
In 52	0.026	0.31	base	28.8	8.5	0.03	0,03	0.51	0.001	0.004	0.72	0.12
In 52MSS	0.024	0.29	base	30.3	7.2	2.52	3.51	0,25	0.0008	0.0006	0.22	0.15

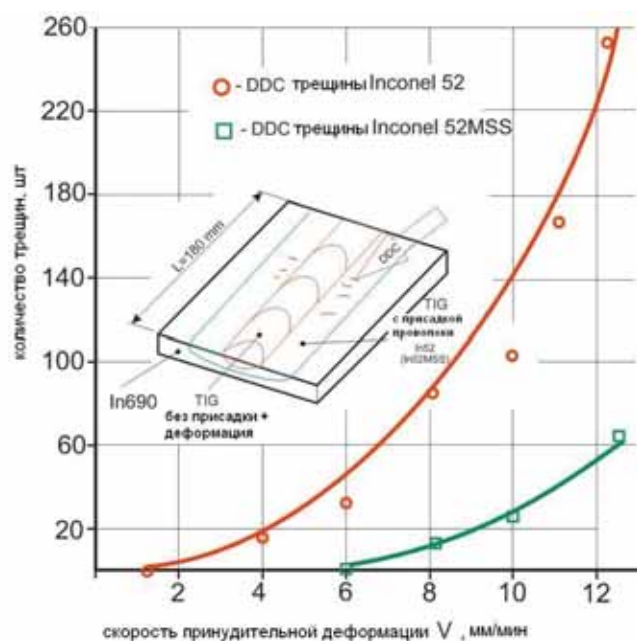
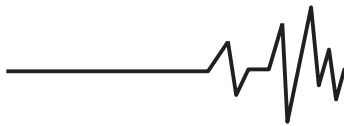


Рис. 2. Влияние скорости движения захватов установки PVR-Test во время проведения TIG сварки на количество трещин в сварном соединении, выполненного проволоками Inconel 52 и Inconel 52MSS



За критерий трещиностойкости принимали количество трещин при заданной скорости деформации. Количество трещин в ЗТВ подсчитывали с использованием оптического микроскопа в темном поле при увеличении $\times 50$.

Обобщенные данные о чувствительности к образованию трещин провала пластичности в швах, выполненных проволоками In 52 и

In52MSS приведен на рис. 2, характер распространения трещин при испытаниях показан на рис. 3 а.

Анализ данных показывает, что при сварке проволокой In52MSS (рис. 3 б) сварные швы при принудительной переменной скорости деформации ниже 6 мм/мин практически нечувствительны к образованию трещин провала пластичности.

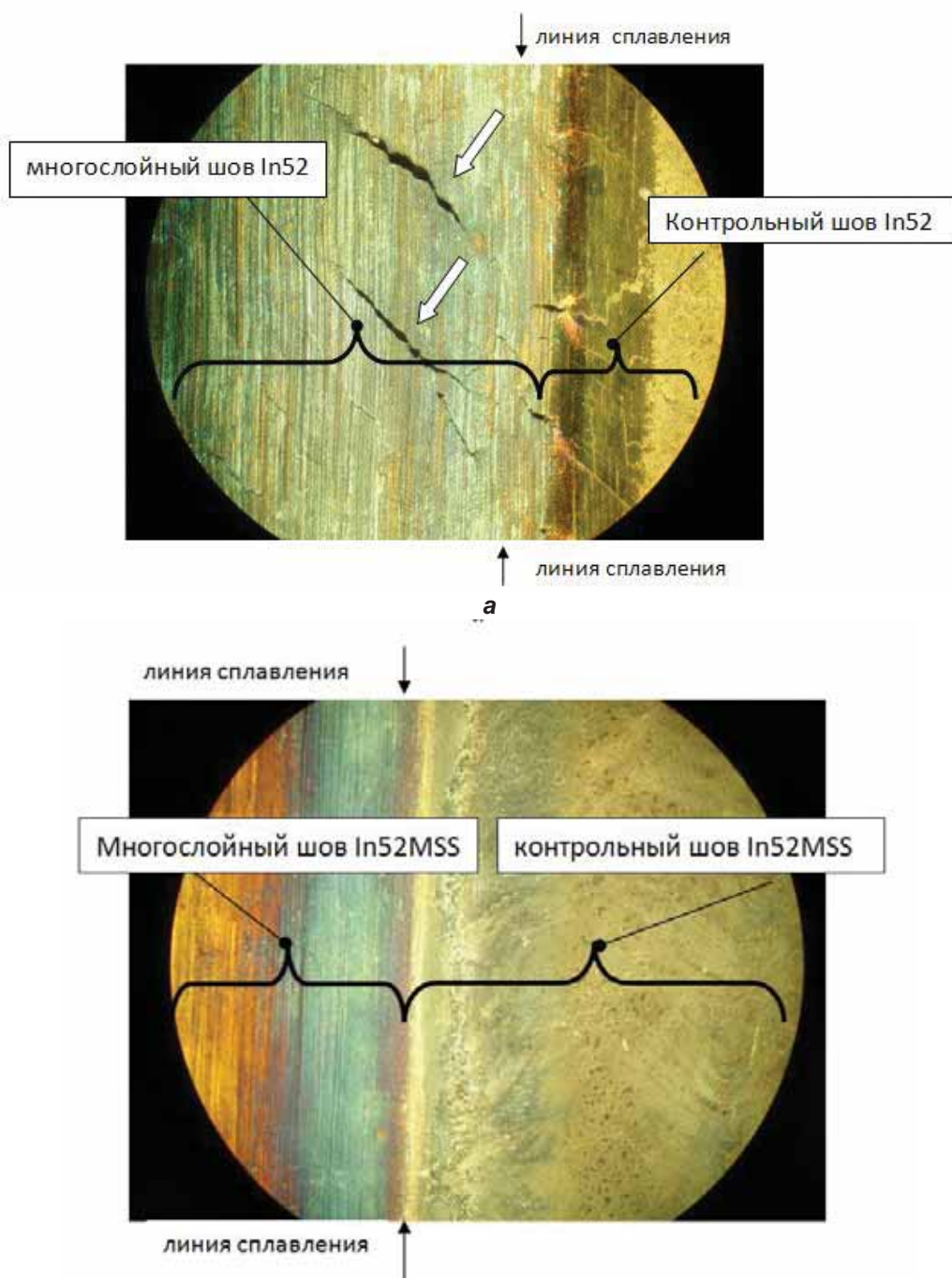
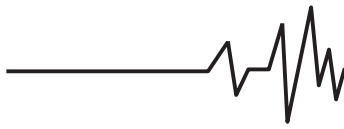


Рис. 3. Вид поверхности швов Inconel 52(а) и Inconel 52MSS (б) после испытаний по методике PVR-Test при скорости деформации ~ 6 мм/мин. Стрелками показаны трещины DDC



Одной из возможных причин межзеренного разрушения при сварке никелевых сплавов является неравновесная сегрегация ряда примесных элементов, в первую очередь серы и кислорода, растворенных на дефектах кристаллической решетки, на границы [5]. Такие данные подтверждаются ОЖЕ-спектроскопией границ зерен [6]. Наличие сегрегации в швах, выполненных на сплавах типа In690 способствует и внутризеренная пластическая деформация в сварных швах под действием сварочного термического цикла [7]. Усиление пластической деформации в приграничных областях зерен в швах такого типа показаны в работе [8].

В ИЭС им. Е.О. Патона исследовали характеристики пластической деформации швов, выполненных проволоками In52 и In52MSS с использованием трансмиссионной микроскопии.

Для исследований тонкой структуры были выбраны многослойные швы (см. рис.1 а), выполненные двумя проволоками In 52 и In 52 MSS. Прямое исследование тонкой структуры

на просвет проводили на микроскопе JEM-200 CX при ускоряющем напряжении 200кV.

Результаты исследований показали, что в структуре металла шва выполненного проволокой In52MSS происходит равномерное распределение дислокаций с невысокой плотностью $\rho \sim 10^6 \dots 10^9 \text{ см}^{-2}$ в объемах зерен (рис. 4 а). Вдоль межзеренных границ незначительное повышение плотности дислокаций, которая составляет $\rho \sim (6 \dots 7) \times 10^9 \dots 10^{10} \text{ см}^{-2}$ (рис. 4 б).

В металле шва выполненного проволокой In 52 в объемах зерен наблюдается повышенная плотность дислокаций до $\rho \sim 2 \times 10^9 \dots 8 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$ (рис.4в). Плотность дислокаций вдоль субграниц возрастает до $\rho \sim 9 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$, значительное увеличение плотности дислокаций зафиксировано у межзеренных границ, которое составляет $\rho \sim 10^{11} \dots 2,2 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ (рис. 4 г).

Измерение скалярной плотности дислокаций проводилось с использованием метода секущей по методикам [8,9].

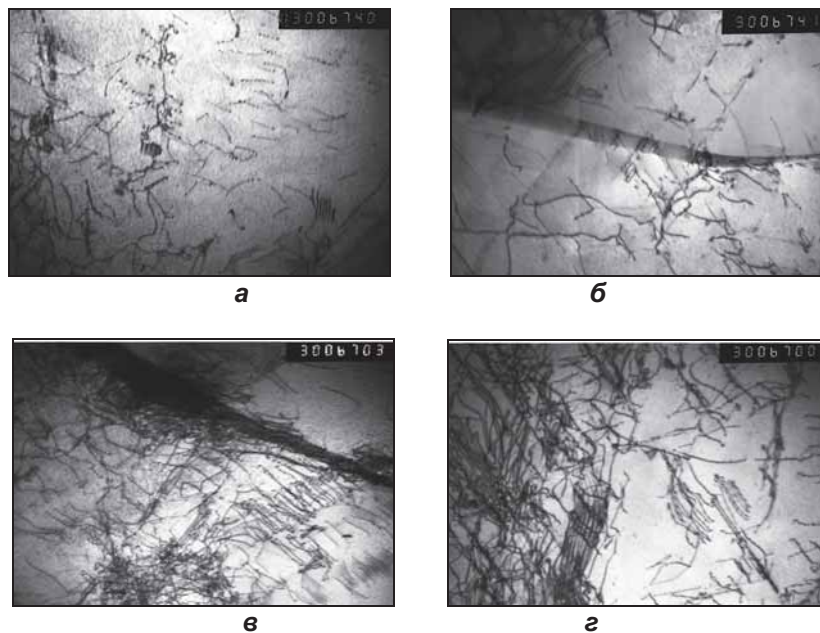


Рис. 4. Тонкая структура и распределение плотности дислокаций в объеме зерен металла шва, выполненного проволокой In 52MSS (а-х 30000); у межзеренных границ металла шва, выполненного проволокой In 52MSS (б-х 30000), в объеме зерен металла шва, выполненного проволокой In 52 (в-х 30000), у межзеренных границ металла шва, выполненного проволокой In 52 (г-х 30000)

Расчет плотности дислокаций проводился по микрофотографиям с увеличением не ниже 30000. Результаты по оценке плотности дислокаций в металле шва

при использовании проволок In 52 MSS и In 52 в различных участках зерна представлены в табл. 2.

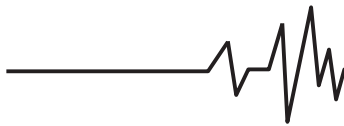


Таблица 2

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

	IN52MSS	IN52
	$\rho, \text{см}^{-2}$	$\rho, \text{см}^{-2}$
Объем зерна	$10^8 \dots 10^9$	$2 \times 10^9 \dots 8 \times 10^{10}$
Субграница зерна	10^9	9×10^{10}
Граница зерна	$6 \dots 7 \times 10^9 \dots 10^{10}$	$10^{11} \dots 2,2 \times 10^{11}$

Величину локализованной деформации ($\epsilon_{\text{лок}}$) определяли по зависимости Конрада [10, 11, 12]. Оценка локализованной деформации ($\epsilon_{\text{лок}}$) в разных исследуемых участках металла шва (объем зерна, приграничная зона) показала, что в случае использования проволоки In 52 MSS в объемах зерен локализованная деформация незначительная и составляет около 1%. У межзеренных границ

значение локализованной деформации несколько повышается до $\epsilon_{\text{лок}}=2 \dots 6\%$. В случае использования проволоки In 52 локализованная деформация возрастает и составляет в объемах зерен до 10%, а у межзеренных границ эта величина составляет порядка 30..40%. Зоны локализованной деформации представлены на рис. 5.

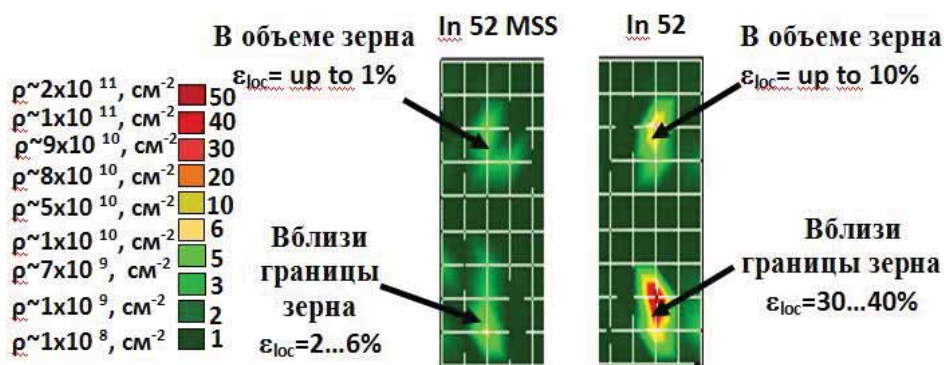


Рис. 5. Зоны локализованной деформации ($\epsilon_{\text{лок}}$) в разных участках металла швов при использовании проволоки In 52 MSS и In 52

Величину локальных внутренних напряжений ($\tau_{\text{л/вн}}$) определяли по формуле для внутренних напряжений [13, 14]. Аналитическая оценка локальных внутренних напряжений ($\tau_{\text{л/вн}}$) показала, что в случае использования проволоки In 52 MSS наблюдается равномерное распределение $\tau_{\text{л/вн}}$, без резких градиентов. В объеме зерен $\tau_{\text{л/вн}}=1,7 \dots 17,34 \text{ МПа}$, что при сопоставлении с теоретической прочностью ($\tau_{\text{ТЕОР}}=4656 \text{ МПа}$) составляет $0,0003 \dots 0,0037 \tau_{\text{ТЕОР}}$. У субграниц

$\tau_{\text{л/вн}}$ практически не изменяется и составляет $17,34 \text{ МПа}$ ($0,0037 \tau_{\text{ТЕОР}}$). В зоне межзеренных границ не столь значительное увеличение плотности дислокаций приводит к некоторому повышению величины локальных внутренних напряжений до значений $\tau_{\text{л/вн}}=104,2 \dots 121,6 \dots 173,7 \text{ МПа}$, что относительно теоретической прочности составляет $0,002 \dots 0,026 \dots 0,037 \tau_{\text{ТЕОР}}$. Данные приведены на рис. 6 и в табл. 3.

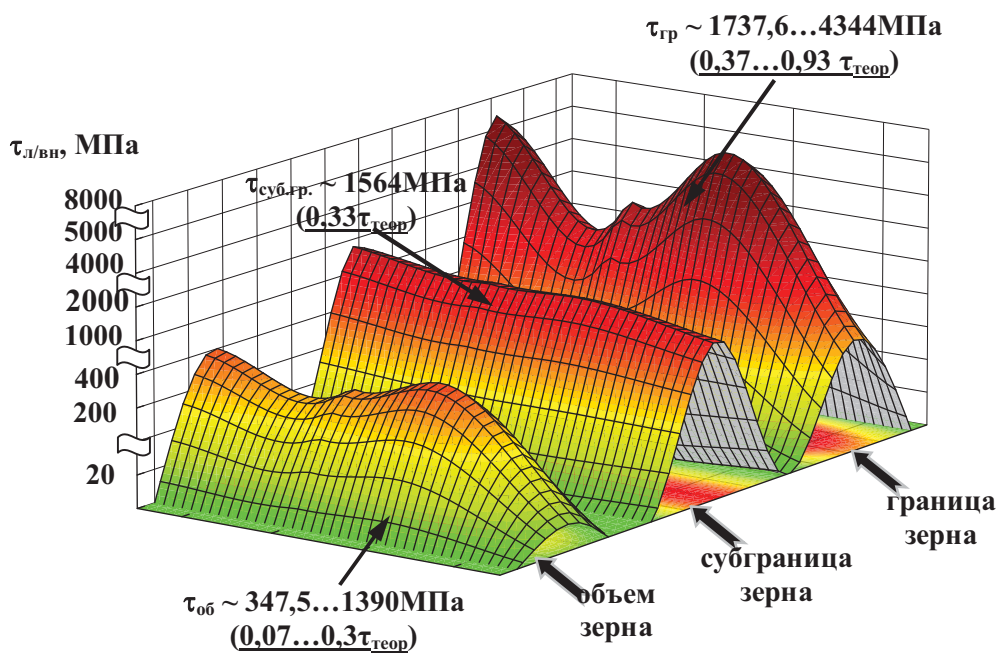
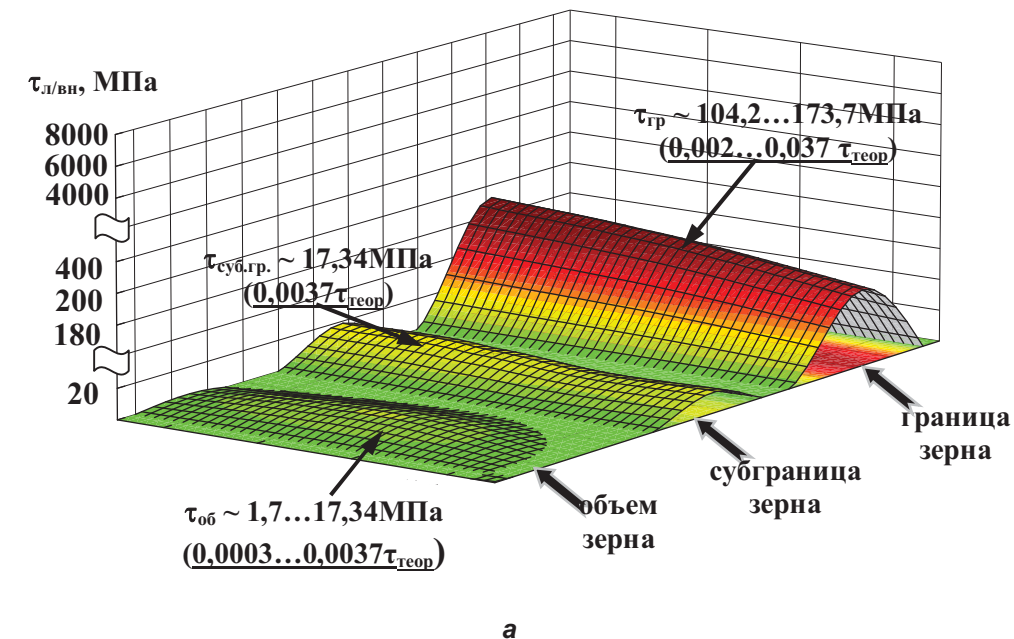
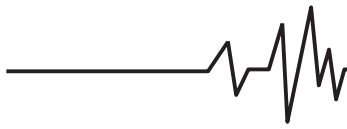


Рис. 6. Распределение локальных внутренних напряжений ($\tau_{л/вн}$) в металле шва при использовании проволоки In 52 MSS (а); при использовании проволоки In 52 (б)

В случае использования при сварке проволоки In 52 наблюдается неравномерное распределение плотности дислокаций в зернограницных объемах металла, что приводит к резкому градиенту локальных внутренних напряжений в соответствующих

областях. Аналитическая оценка показала, что в объеме зерна $\tau_{л/вн}=347,5...1390$ МПа, что относительно теоретической прочности составляет $(0,074...0,3\tau_{теор})$, вдоль субграниц наблюдается возрастания $\tau_{л/вн}$ и составляет 1564 МПа $(0,33\tau_{теор})$. Однако, в области



межзеренных границ наблюдается резкое увеличение плотности дислокаций ($10^{11} \dots 2,2 \times 10^{11} \text{см}^{-2}$), способствующее возрастанию величины локальных внутренних

напряжений в этой области до значений $\tau_{л/вн} 1737,6 \dots 3822,7 \text{МПа}$, что составляет порядка $0,37 \dots 0,82 \tau_{теор}$ (рис. 6, табл. 3).

Таблица 3

Значения локальных внутренних напряжений ($\tau_{л/вн}$): во внутренних объемах зерен и вдоль межзеренных и субзеренных границ в металле швов различного легирования

	IN52MSS	IN52
	$\tau_{л/вн}$, МПа ($X \cdot \tau_{теор}$)	$\tau_{л/вн}$, МПа ($X \cdot \tau_{теор}$)
Объем зерна	1,74...17,3 (0,0003...0,0037 $\tau_{теор}$)	347,5...1390МПа (0,074...0,3 $\tau_{теор}$)
Субграница зерна	17,34 (0,0037 $\tau_{теор}$)	1564МПа (0,33 $\tau_{теор}$)
Граница зерна	104,2...121,6...173,7 (0,022...0,026...0,037 $\tau_{теор}$)	1737,6...3822,7МПа (0,37...0,82 $\tau_{теор}$)

Одним из параметров дефектообразования является энергия дефекта упаковки (ЭДУ), которую можно измерять по ширине расщепления дислокаций [9, 15].

В металле шва при использовании проволоки In 52 MSS ширина расщепления дислокаций в среднем составляет $0,045 \dots 0,07 \text{мкм}$, как в объеме зерен так и у межзеренных границ (рис. 4а,б). Данная

ширина соответствует значению энергии дефекта упаковки порядка $\gamma_{ЭДУ} = 0,091 \text{Дж/м}^2$, рис. 7.

В металле шва при использовании проволоки In 52 ширина расщепления дислокаций по телу зерна уменьшается в среднем до $0,022 \dots 0,04 \text{мкм}$, что соответствует $\gamma_{ЭДУ} = 0,19 \text{Дж/м}^2$ (рис. 4в,г). Значения ЭДУ изображены на рис. 7.

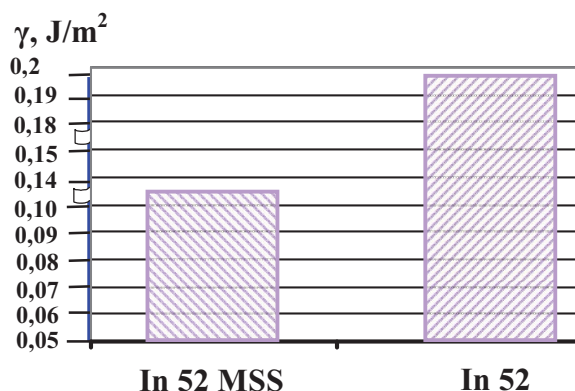


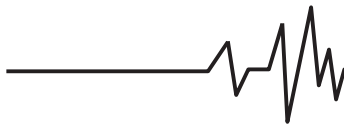
Рис. 7. Изменение энергии дефектов упаковки γ , Дж/м²

Выводы

1. Проведена оценка склонности к образованию трещин провала пластичности металла многослойных швов, полученных с помощью проволок In52 и In52MSS на установке PVR-Test. Швы, выполненные проволокой In52, по сравнению со швами In52MSS, имеют высокую чувствительность к образованию трещин провала пластичности (DDC) в зоне термического влияния (ЗТВ). Трещины возникают при скорости

деформирования менее 2 мм/мин. В швах, выполненных проволокой In52MSS, трещины данного типа возникают при скорости деформирования более 6 мм/мин.

2. Установлено, что тонкая структура шва при использовании проволоки In52 характеризуется высокой плотностью дислокаций особенно у границ зерен (порядка до $\rho \sim 10^{11} \dots 2,2 \times 10^{11} \text{см}^{-2}$); высоким уровнем локализованной деформации (до $\epsilon_l = 30 \dots 40\%$) и значительными локальными внутренними напряжениями ($\tau_{л/вн} = 1737,6 \dots 4344 \text{МПа}$,



0,37...0,93...1,12 $\tau_{теор}$) особенно у границ зерен. Также наблюдается увеличение энергии дефектов упаковки (порядка $\gamma_{эд\text{у}}=0,19\text{Дж/м}^2$). В случае использования проволоки In 52 MSS имеет место равномерное (без градиентов) распределение плотности дислокаций, низкий и равномерный уровень локализованной деформации (до $\epsilon_{л}=6\%$) и локальных внутренних напряжений (до $\tau_{л/вн}=173,7\text{МПа}$, $0,37\tau_{теор}$), а также снижается энергия дефектов упаковки (порядка $\gamma_{эд\text{у}}=0,091\text{Дж/м}^2$).

3. Можно предположить, что образование трещин провала пластичности является предельным состоянием степени деградации границ зерен, при котором происходят необратимые нарушения связей притяжения между атомами.

Список использованных источников

1. Torres E.A., Peternella F. G., Caram R. and Ramirez A. J. In Situ Scanning Electron Microscopy High Temperature Deformation Experiments to Study Ductility Dip Cracking of Ni-Cr-Fe Alloys // (eds.), in: In-situ Studies with Phonons, Neutrons and Electrons Scattering ed. by T. Kannengiesser et al. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2010, p. 28.

2. K. Yushchenko, V. Savchenko, N. Chervyakov, A.Zvyagintseva, E.Guyot. Comparative hot cracking evaluation of welded joints of alloy 690 using filler metals Inconel® 52 and 52 MSS, *Welding in the World*, 2011. Vol. 55, № 9/10, P. 28–35.

3. Lippold J.C., Kotecki D.J. *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels*, Copyright, 2005 by John Wiley&Sons.

4. ISO/TR 17641-3:2005. Destructive tests on welds and metallic materials – Hot cracking tests for weldments – Arc welding processes – Part 3: Externally loaded tests.

5. S.-H. Song, O. Zhang, L.-Q. Weng, Deformation-induced non-equilibrium boundary segregation in dilute alloys // *Materials Science and Engineering*. – 2008. – A473. – P. 226–232.

6. V.S. Savchenko, K.A. Yushchenko, A. Zvyagintseva, S.A. David, J.M. Vitek. Investigation of structure and crack formation in welded joints of single crystal Ni-base alloys, *Welding in the World*, Vol, 51, n°11/12, 2007. P. 76–81.

7. K. Saida, K. Nishimoto. Regulatory Criteria of Minor and Impurity Elements for Welding Integrity of Alloy 690 and Alloy 690 to Type 316L Stainless Steel Multipass Welds – Evaluation in: *Int. Symp. on the Ageing Management & Maintenance of Nuclear Power Plants (2010)* 207–220.

8. Collins M.G., Ramirez A.I. Lippold J.C. An Investigation of Ductility-Dip Cracking in Nickel-Based Weld Metals-Part III. *Welding Journal*, N2, 2004, s.39 s-49 s.

9. П. Хирш, А. Хови, Р. Николсон и др. *Электронная микроскопия тонких кристаллов* – Москва: Мир, 1968. – 574 с.

10. Сузуки Х.О. пределе текучести поликристаллических металлов и сплавов / Сузуки Х.О // *Структура и механические свойства металлов*. – Москва: Металлургия, 1967. – С. 255 – 260.

11. Трефилов В.И., Моисеев В.Ф., Печковский Э.П и др. *Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических металлов* / К.: Наук. думка, 1987. – 248 с.

12. H. Conrad. Effect of grain size on the lower yield and flow stress of iron and steel / H. Conrad // *Acta metallurgica*. –1963. – 11. – P. 75–77.

13. Маркашова Л.И., Кушнарева О.С. Влияние структуры на механические свойства металла шва сварных соединений алюминиевых сплавов системы Al-Cu-Li // *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. – 2013. – №.5. – С. 112–118.

14. Кэ А.С. Прямое наблюдение несовершенств в кристаллах. – М.: Металлургия. – 1964. – С. 160–178с.

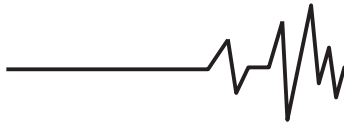
15. Конева Н.А. Дислокационно-дисциплинационные субструктуры и упрочнения / Н.А. Конева, Д.В. Лычагин, Л.А. Теплякова [и др.] // *Теоретическое и экспериментальное исследование дисциплинаций*. сб статей. – Ленинград: Изд-во ЛФТИ. – 1986. – С. 116–126.

Список источников в транслитерации

1. Torres E. A. 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 and A. J. Ramirez // (eds.), in: In-situ Studies with Phonons, Neutrons and Electrons Scattering ed. by T. Kannengiesser et al. - Berlin Heidelberg.: Springer-Verlag, 2010. – p. 28.

2. Yushchenko K. Comparative hot cracking evaluation of welded joints of alloy 690 using filler metals Inconel® 52 and 52 MSS / K. Yushchenko, V. Savchenko, N. Chervyakov, A.Zvyagintseva, E.Guyot // *Welding in the World*. – 2011.– Vol. 55, № 9/10, – P. 28–35.

3. Lippold J. C. *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels* / J. C. Lippold, D. J. Kotecki – Hoboken: Wiley, 2005. – 241p.



4. ISO/TR 17641-3:2005. Destructive tests on welds and metallic materials – Hot cracking tests for weldments – Arc welding processes – Part 3: Externally loaded tests.

5. Song, S.-H. Deformation-induced non-equilibrium boundary segregation in dilute alloys S.-H. Song, O. Zhang, L.-Q. Weng // *Materials Science and Engineering*. – 2008. – A473. – P. 226–232.

6. Savchenko V. S. Investigation of structure and crack formation in welded joints of single crystal Ni-base alloys / V. S. Savchenko, K. A. Yushchenko, A. V. Zvyagintseva, S. A. David, J. M. Vitek // *Welding in the World*. – 2007. – Vol. 51, №. 11/12. – P.76–81.

7. Saida K. Regulatory Criteria of Minor and Impurity Elements for Welding Integrity of Alloy 690 and Alloy 690 to Type 316L Stainless Steel Multipass Welds – Evaluation / K. Saida, K. Nishimoto // *Int. Symp. on the Ageing Management & Maintenance of Nuclear Power Plants*. – 2010. – P.207–220.

8. Collins M. G. An Investigation of Ductility-Dip Cracking in Nickel-Based Weld Metals-Part III / M. G. Collins, A. I. Ramirez, J. C. Lippold // *Welding Journal* – 2004. – №. 2. – P. 39–49.

9. Khirsh P. Elektronnaya mikroskopiya tonkikh kristallov / P. Khirsh, A. Khovi, R. Nikolson I dr. – M.: Mir, 1968. – 574 s.

10. Suzuki Kh. O. O predele tekuchesti polikristallicheskih metallov s splavov / Kh. O. Suzuki. – M.: Metallurgiya, 1967. – S. 255 – 260.

11. Trefilov V. I. Deformatsionnoe uprochnenie I razrushenie polikristallicheskih metallov / V. I. Trefilov, V. F. Moiseev, E. P. Pechkovsky i dr. – K.: Nauk. Dumka, 1987. – 248 s.

12. Conrad H. Effect of grain size on the lower yield and flow stress of iron and steel / H. Conrad // *Acta metallurgica*. –1963. – №. 11. – P. 75–77.

13. Markashova L.I. Vliyanie struktury na mehanicheskie svoystva metalla shva svarykh soedineniy alyuminievih splavov sistemy Al-Cu-Li /

L. I. Markashova, O. S. Kushnareva // *Fiziko-khimichna mekhanika materialiv*. – 2013. – №.5. – S. 112–118.

14. Ke A. S. Pryamoe nablyudenie nesovershenstv v kristallakh / A. S. Ke. – M.: Metallurgiya, – 1964. – S. 160–178.

15. Koneva N. A. Dislokatsionno-disklinatsionnye substrukturny i uprochneniya / N. A. Koneva, D. V. Lychagin, L. A. Teplyakova i dr. // *Teoreticheskoe i eksperimentalnoe issledovanie disklinatsiy*. Sb. Statey. – Leningrad: izdatelstvo LFTI, – 1986. – S. 116–126.

СТРУКТУРНІ АСПЕКТИ І АНАЛІТИЧНІ ОЦІНКИ ЛОКАЛЬНОГО ОХРУПЧУВАННЯ ЗВАРНИХ ШВІВ НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ

Анотація. Комплексне дослідження структури металу шва нікелевих сплавів In 52 і In 52MSS з подальшою аналітичною оцінкою щільності дислокацій, значення локалізованої деформації, локальних внутрішніх напружень, енергії дефекту упаковки в різних областях структурних компонентів було зроблено за допомогою просвічує електронної мікроскопії.

Ключові слова: падіння пластичності, нікелеві сплави, гарячі тріщини, багатопрхідні шви, тонка структура.

STRUCTURAL ASPECTS AND ANALYTICAL EVALUATION OF LOCAL EMBRITTLEMENT OF NICKEL ALLOY WELDS

Annotation. Complex research of structure of weld metal of nickel alloys In 52 and In 52MSS followed by analytical evaluation of the dislocation density, the values of localized deformation, local internal stresses, stacking fault energy in the different areas of the structural components was done by transmission electron microscopy.

Key words: ductility-dip, nickel-based alloys, hot cracks, multi-pass welds, fine structure.