

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОКРЫТИЯ ИЗ ПОРОШКОВ БРОНЗЫ И БАББИТА МЕТОДОМ ГОРЯЧЕГО ПРЕССОВАНИЯ**

Исследована возможность формирования покрытия из порошков бронзы и баббита на поверхности стального изделия методом горячего прессования. Разработана экспериментальная установка, исследованы структура и свойства покрытия. Разработанный способ в отличие от других позволяет использовать в качестве сырья измельченную стружку и может быть использован для изготовления и ремонта единичных изделий судовой запорной арматуры.

**Ключевые слова:** горячее прессование, порошки бронзы, стружка баббита, покрытие.

*Казимиренко Юлія Олексіївна, кандидат технічних наук, доцент, кафедра матеріалознавства і технології металів, Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: u.a.kazimirenko@gmail.com.*

*Лебедева Наталія Юрївна, кандидат технічних наук, доцент, кафедра матеріалознавства і технології металів, Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Миколаїв, Україна.*

*Казимиренко Юлія Алексеевна, кандидат технических наук, доцент, кафедра материаловедения и технологии металлов, Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина.*

*Лебедева Наталья Юрьевна, кандидат технических наук, доцент, кафедра материаловедения и технологии металлов, Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина.*

*Kazymyrenko Yuliia, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: u.a.kazimirenko@gmail.com. Lebedeva Nataliia, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine*

УДК 621.791.052:539.4

DOI: 10.15587/2312-8372.2015.51449

**Беляев Г. Б.,  
Волосатов И. Р.,  
Каховский Н. Ю.**

**ВЛИЯНИЕ МНОГОПРОХОДНОЙ СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ НА ЭНЕРГИЮ ГРАНИЦ ЗЕРЕН НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ**

В работе описана методика расчета энергии когезии границ зерен многослойных наплавов, выполненных сварочной проволокой на никелевой основе In52, In52 MSS. В основе работы теория баланса энергии границы зерна и энергии поверхности. Методом термического травления и световой интерферометрии оценена анизотропия и деградация энергетических характеристик границ зерен.

**Ключевые слова:** граница зерна, трещина провала пластичности, энергия сегрегации, энергия когезии, адсорбция.

**1. Введение**

Образование и распространение трещин в поликристаллических металлах и сплавах происходит на этапе их изготовления, обработки или технологических операций. Причиной падения прочности металлов и сплавов есть сегрегация примесных атомов на границах зерен (ГЗ). Тенденция повышения требований к качеству и удельной прочности металлических материалов делает проблему трещинообразования весьма актуальной в современной науке и технике. Зарождение и рост трещины в поликристаллическом сплаве характеризуется балансом между кинетикой роста трещины и сопротивляемостью сплава [1]. Параметром сопротивления сплава есть энергия когезии (ЭК). Основными факторами снижения ЭК могут быть: аккумуляция дислокаций в приграничных областях, высокая кристаллографическая разориентация соседних зерен, сегрегация и адсорбция примесных атомов на ГЗ. Зернограничная сегрегация атомов S, O в аустенитных высоколегированных сплавах приводит к образованию межкристаллитных хрупких трещин [2].

**2. Анализ литературных данных и постановка проблемы**

Пластичность аустенитных высоколегированных сталей и сплавов на никелевой основе при статических

кратковременных испытаниях на растяжение снижается в температурном интервале хрупкости (ТИХ) 600–1000 °С. При выполнении многопроходной сварки плавлением возможно образование подваликовых трещин провала пластичности (ТПП) на ГЗ. Исследование поверхности излома показывает межкристаллитный хрупкий излом. Происходит аномально быстрый вязкохрупкий переход в тонких приграничных областях.

Для расчета внутренней энергии ГЗ использовалась дислокационная модель, предложенная Ридом и Шоккли. Модель учитывает влияние ориентации плоскостей кристаллической решетки зерна, с учетом упругой энергии ядра дислокаций на энергию ГЗ [3]. Согласно авторам работы [4, 5], увеличение вклада направленной ковалентной связи приводит к снижению ЭК и повышению склонности к охрупчиванию ГЗ. Наиболее вероятными причинами этого является адсорбция примесных атомов на ГЗ или скопление активных дислокаций вдоль поверхности раздела [6].

Образование ТПП происходит из-за разрушения энергетических (кулоновских) связей между атомами. Энергия  $E_{gb}$  «цельной» границы зерна расходуется на образование двух новых поверхностей с энергией  $E_s$ . Разница между этими двумя параметрами называется энергией когезии  $E_{coh}$ , которая является критерием прочности границы [7]. Работа основывается на известных научных данных исследователей термодинамики ГЗ

и собственных экспериментальных методиках. Проведены эксперименты и выполнены расчеты энергетических свойств ГЗ In52 и In52 MSS. Получены новые данные термодинамики ГЗ исследуемых сплавов после многослойной сварки плавлением. Рассчитан интервал энергии когезии ГЗ сплавов, при которых возможно образование ТПП и аномальное снижение механических свойств.

### 3. Объект, цель и задачи исследования

*Объект исследования* – наплавка, выполненная проволокой In52; контрольный шов, нанесенный проволокой In52 на первоначальную многослойную наплавку с принудительным деформированием.

*Целью работы* является определение влияния кристаллографической разориентации соседних зерен зоны термического влияния (ЗТВ) наплавки In52 и сегрегации S, O на энергию когезии.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить такие задачи:

1. Определение кристаллографической ориентации зерен ЗТВ наплавки In52 без ТПП, In52 с ТПП.
2. Вакуумное травление поверхности ЗТВ многослойной наплавки.
3. Определение геометрических размеров профиля канавки травления ГЗ в ЗТВ.
4. Расчет энергии когезии и концентрации S, O на поверхности ТПП.
5. Анализ поверхности ТПП с помощью ОЖЕ-спектроскопии.

### 4. Исследование энергии

С учетом геометрических особенностей канавок травления за формулами (1), (2) рассчитывается зависимость энергии ГЗ от энергии поверхности зерна. Углы  $\alpha$  и  $\beta$  рассчитываются отдельно, чтобы учесть несимметричность профиля и уменьшить погрешность измерения:

$$\frac{A+B}{d_{1,2}} = \frac{4,73}{\text{tg}(\alpha,\beta)}, \quad (1)$$

$$\frac{E_{gb}}{E_s} = 2\cos\left(\frac{\psi_s}{2}\right), \quad (2)$$

где  $A + B$  – ширина ГЗ, Дж/м<sup>2</sup>;  $d_{1,2}$  – глубина канавки травления с учетом 1-го и 2-го зерна, мкм;  $E_{gb}$  – энергия ГЗ, Дж/м<sup>2</sup>;  $E_s$  – энергия поверхности зерна, Дж/м<sup>2</sup>;  $\psi_s$  – двугранный угол раскрытия ГЗ, град.

Энергия дислокационной ГЗ на квадратный сантиметр поверхности раздела определяется за формулами (3)–(5). Энергия когезии есть разница между величиной энергии двух поверхностей ТПП и энергией ГЗ до разрушения (6).

$$E_{gb} = E_0\theta(A - \ln\theta), \quad (3)$$

$$E_0 = \frac{\mu b}{4\pi(1-\nu)}, \quad (4)$$

$$A_0 = \frac{4\pi(1-\nu)B_k}{\mu b^2}, \quad (5)$$

где  $\mu$  – модуль сдвига, Мпа;  $b$  – вектор Бюргерса, нм;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $B_k$  – энергия ядра дислокации, Дж;  $\theta$  – угол разориентации, град.

$$E_{coh} = 2E_s - E_{gb}, \quad (6)$$

где  $E_{coh}$  – энергия когезии, Дж/м<sup>2</sup>;  $E_s$  – поверхностная энергия, Дж/м<sup>2</sup>;  $E_{gb}$  – энергия границы зерна, Дж/м<sup>2</sup>.

Изменение атомной связи на ГЗ, за счет сегрегации, приводит к снижению ЭК. Учитывая энергетические особенности каждой примеси и плотность атомов  $A$  (атом/м<sup>2</sup>), по формуле (7) можно рассчитать ЭК границ зерен в состоянии после сегрегации:

$$E_{coh} = 2E_s - E_{gb} - (\Delta E_{gb}^{seg} - \Delta E_s^{seg}) \cdot A, \quad (7)$$

где  $(2E_s - E_{gb})$  – энергия когезии без сегрегации, Дж;  $\Delta E_{gb}^{seg}$  – энтальпия сегрегации примеси на ГЗ, Дж;  $\Delta E_s^{seg}$  – энтальпия сегрегации примеси на поверхности зерна, Дж;  $(\Delta E_{gb}^{seg} - \Delta E_s^{seg})$  – энергетический вклад адсорбции в  $E_{coh}$ , Дж;  $A$  – плотность примеси, нм<sup>-1</sup>.

**4.1. Методика исследования энергии.** В качестве экспериментальных образцов выбраны многослойные швы, выполненные присадочной проволокой In52:

- 1) образец, выполненный в разделку многослойный шов;
- 2) образец получен после нанесения на первоначальную многослойную наплавку контрольного шва с дополнительным принудительным деформированием. В результате чего в зоне термического влияния образовались трещины провала пластичности (ТПП). Химический состав сплавов приведен в табл. 1.

Работа выполнялась на растровом электронном микроскопе Quanta 200 3D с детектором вторичных электронов Эверхарта-Торнли (EBSD) и столиком нагрева. Основное внимание уделялось высокоугловым границам зерен, как основных мест образования ТПП [8]. После определения кристаллографической ориентации образцы сплавов травились в вакуумной камере микроскопа. Измерение геометрических размеров профиля ГЗ выполнялось на световом микроинтерферометре ЛИННИКА МИИ-4 для зеленого светофильтра [9].

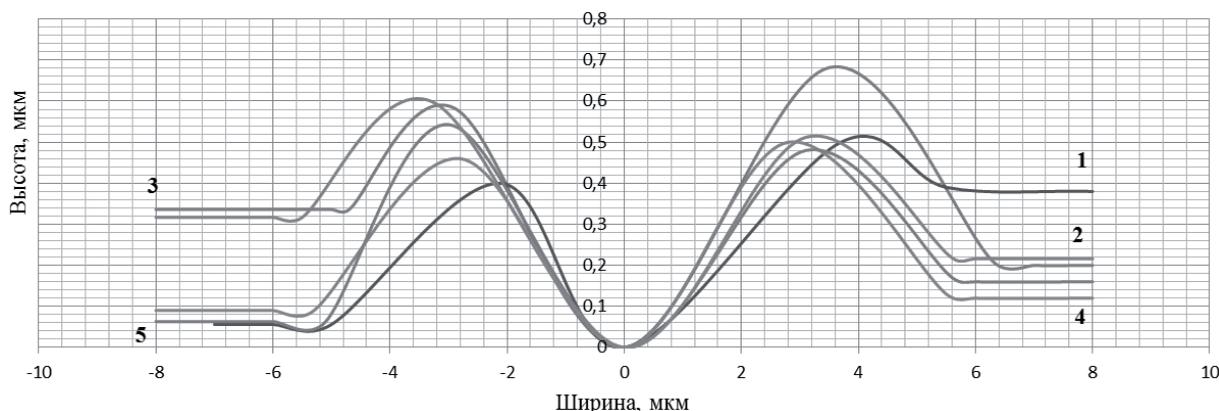
Таблица 1

Химический состав проволоки In52

Концентрация элемента, масс. %											
C	Mn	Ni	Cr	Fe	Nb + Ta	Mo	Ti	S	P	Al	Si
0,021	0,24	59,17	29,19	9,99	<0,01	0,01	0,51	0,001	0,003	0,72	0,12

**4.2. Результаты исследования энергии.** Визуальное наблюдение за процессом травления ГЗ показало, что они довольно чувствительны к повышению температуры. При температуре 900 °С начинается процесс термического травления ГЗ. Схематические профили ГЗ сплава In52 после травления изображено на рис. 1.

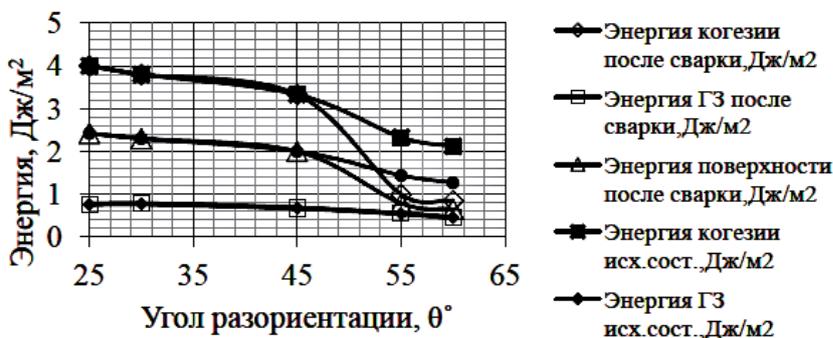
званы дискретным массопереносом примесей вдоль полос скольжения. Кривые графика зависимости ЭК от угла разориентации зерен наплавки In52 в исходном состоянии и после нанесения контрольного шва указывают, что деградация межзеренной микроструктуры происходит в диапазоне углов 45–60° (рис. 2).



**Рис. 1.** Схематический профили ГЗ исходного образца наплавки In52 с кристаллографическими ориентациями зерен: 1 — 25°; 2 — 60°; 3 — 55°; 4 — 45°; 5 — 30°

Значения энергии ГЗ, поверхностной энергии, энергии когезии и ширины границы показаны в табл. 2.

Трещины образуются в ЗТВ на ГЗ сплава In52 после нанесения контрольного шва в интервале кристаллографической разориентации 45–60°. В исходном состоянии ГЗ имеют низкую ЭК 3,33–2,12 Дж/м<sup>2</sup>. Сварочный нагрев создает напряжения в теле зерна, которые приводят к генерации новых дислокационных источников и скоплению дислокаций вдоль ГЗ. Аномальный массоперенос примесных атомов с тела зерна из-за адсорбции S и O снижает энергию когезии на 1–2 Дж/м<sup>2</sup>. Параметры энергии ГЗ с ТПП указаны в табл. 3.



**Рис. 2.** Зависимость энергии когезии  $E_{coh}$  от угла разориентации  $\theta$  зерен сплава In52 в исходном состоянии и после сварки плавлением

**Таблица 2**  
Параметры границ зерен исследуемых сплавов

Сплав	$\theta$ , град	$\gamma_{gb}$ , Дж/м <sup>2</sup>	$\gamma_{coh}$ , Дж/м <sup>2</sup>	$\gamma_s$ , Дж/м <sup>2</sup>	W, мкм	$\Psi$ , град
In52	25	0,77	4	2,42	5,9	163
	30	0,78	3,8	2,3	6,2	162
	45	0,68	3,33	2	5,6	161
	55	0,55	2,33	1,44	6,4	158
	60	0,46	2,12	1,27	6,4	160

**Таблица 3**  
Параметры термодинамического состояния ГЗ с трещиной

In 52	$\theta$ , град	$\gamma_{gb}$ , Дж/м <sup>2</sup>	$\gamma_{coh}$ , Дж/м <sup>2</sup>	$\gamma_s$ , Дж/м <sup>2</sup>	W, мкм	$\Psi$ , град	№ ГЗ
In 52	45–60	0,46	1,8	1,15	6,6	157	1
		0,55	1,31	0,93	6,7	146	2
		0,68	1,26	0,97	6,6	139	3

На некоторых ГЗ наблюдаются точечные надрывы (линии интерферометра обрываются), которые вы-

Снижение энергии когезии ГЗ на углах разориентации 55–60° составляет 1,1–1,3 Дж/м<sup>2</sup>. Этого достаточно для уменьшения предела прочности на разрыв до уровня локальных напряжений, возникающих во время охлаждения после сварки плавлением [10].

В табл. 4 указаны максимальные концентрации S и O (в ат. %), которые обеспечивают снижение ЭК до величины образования ТПП, с учетом того, что элементы действуют раздельно. Если брать во внимание максимальную объемную растворимость кислорода в жидком никеле и исходную объемную концентрацию серы в сплаве, то пропорциональное соотношение между ними составляет 4,5–5 раз. За счет более высокой растворимости кислорода в металле шва, влияние его как охрупчивающего элемента, более весомо. Профиль кривых концентрации S и O совпадает на всем интервале травления, что объясняется практически равной энергией адсорбции. Разница в точках кривых составляет 4,5–5 раз. Средняя концентрация O и S на поверхности ТПП, для высокоугловых границ, находится в интервале 2,3–4,5 и 0,5–1 ат. %, соответственно. Концентрация S и O на поверхности ТПП измерена методом ОЖЕ-спектрометрии (рис. 3).

Таблица 4

Расчетная концентрация S и O на ГЗ в зависимости от энергии когезии  $E_{coh}$

Угол разориентации, $\theta$ , град	$E_{coh}$ , Дж/м <sup>2</sup>	$C_{max}$ , ат. % S	$C_{max}$ , ат. % O	$C_{crack}$ , ат. % S	$C_{crack}$ , ат. % O
45	3,80	0	0	0	0
	3,5	1	0,8	0,16	0,7
	3	2,40	2,2	0,40	1,8
	2,5	3,9	3,5	0,67	2,9
	2	5	4,8	0,9	4
	1,8	6	5,4	1	4,5
55	3,33	0	0	0	0
	3	0,95	0,85	0,16	0,7
	2,5	2,45	2,2	0,4	1,8
	2	3,9	3,5	0,67	2,9
	1,5	5,4	4,8	0,9	4
	1,31	6	5,4	1	4,4
60	2,33	0	0	0	0
	2	0,98	0,88	0,16	0,73
	1,8	1,60	1,44	0,27	1,2
	1,65	2	1,8	0,34	1,5
	1,5	2,47	2,2	0,42	1,8
	1,26	3,2	2,88	0,5	2,3

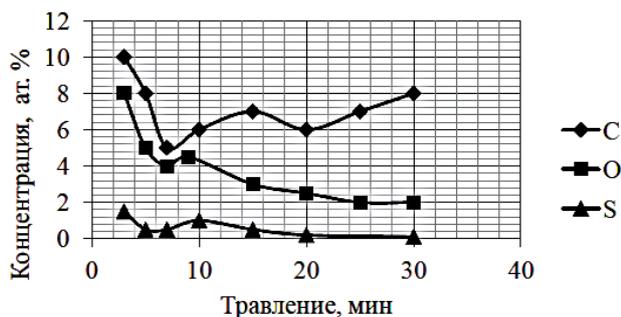


Рис. 3. Экспериментальная концентрация примесей на поверхности ТП

5. Выводы

В результате проведенных исследований:

1. С повышением угла разориентации  $\theta$  энергия когезии уменьшается.
2. Менее стойкими к образованию ТПП являются высокоугловые ГЗ 45–60° со средней  $E_{coh}$  в 3,1 Дж/м<sup>2</sup>.
3. Сплав In52 склонен к образованию подваликовых ТПП во время многопроходной сварки плавлением; падение энергии когезии до 1,8–1,26 Дж/м<sup>2</sup>.
4. Снижение ЭК в сплавах In52 при многопроходной сварке плавлением связано с сегрегацией S и O с тела зерна на его границу.
5. Средняя концентрация O и S на поверхности ТПП, для высокоугловых границ, находится в интервале 2,3–4,5 и 0,5–1 ат. %, соответственно.

Литература

1. Mahalingam, S. The ductile-brittle transition for nominally pure polycrystalline nickel [Text] / S. Mahalingam, P. E. J. Flewitt, J. F. Knott // Materials Science and Engineering: A. — 2013. — Vol. 564. — P. 342–350. doi:10.1016/j.msea.2012.11.106

2. Liu, A. F. Mechanics and Mechanisms of Fracture: An Introduction [Text] / A. F. Liu. — Materials Park: ASM International, 2005. — 458 p.

3. Van Bueren, H. G. Imperfections in Crystals [Text] / H. G. Van Bueren. — North-Holland, Amsterdam: Interscience, 1960. — 676 p.

4. Lu, G. Connecting microscopic structure and macroscopic mechanical properties of structural materials from first-principles [Text] / G. Lu, L. Zhang // Science China Physics, Mechanics and Astronomy. — 2012. — Vol. 55, № 12. — P. 2305–2315. doi:10.1007/s11433-012-4951-y

5. Yokobori, T. The strength, fracture, and fatigue of materials [Text] / T. Yokobori. — Michigan: P. Noordhoff, 1963. — 261 p.

6. Flewitt, P. E. J. Grain Boundaries: Their Microstructure and Chemistry [Text] / P. E. J. Flewitt, R. K. Wild. — Chichester: John Wiley and Sons Ltd., 2001. — 338 p.

7. Rice, J. R. Embrittlement of interfaces by solute segregation [Text] / J. R. Rice, J.-S. Wang // Materials Science and Engineering: A. — 1989. — Vol. 107. — P. 23–40. doi:10.1016/0921-5093(89)90372-9

8. Cheng, Y. On intrinsic brittleness and ductility of intergranular fracture along symmetrical tilt grain boundaries in copper [Text] / Y. Cheng, Z.-H. Jin, Y. W. Zhang, H. Gao // Acta Materialia. — 2010. — Vol. 58, № 7. — P. 2293–2299. doi:10.1016/j.actamat.2009.11.033

9. Рябухо, В. П. Когерентно-оптические методы в измерительной технике и биофотонике [Текст]: учебное пособие / под ред. В. П. Рябухо, В. В. Тучина. — Саратов: Сателлит, 2009. — 127 с.

10. Ghani, A. Residual stresses and heat treatments for metallic welded components [Text] / A. Ghani. — Dublin: Dublin City University School of Mechanical and Manufacturing Engineering. 1994. — 265 p.

ВЛИВ БАГАТОПРОХІДНОГО ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ НА ЕНЕРГІЮ ГРАНИЦЬ ЗЕРЕН НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ

У роботі описана методика розрахунку енергії когезії кордонів зерен багатшарових наплавлень, виконаних зварювальним дротом на нікелевій основі In52, In52 MSS. В основі роботи теорія балансу енергії кордону зерна та енергії поверхні. Методом термічного травлення і світлової інтерферометрії оцінена анізотропія і деградація енергетичних характеристик кордонів зерен.

**Ключові слова:** границя зерна, тріщина провалу пластичності, енергія сегрегації, енергія когезії, адсорбція.

*Беляев Григорий Борисович, младший научный сотрудник, отдел металлургии и технологии сварки высоколегированных сталей и сплавов, Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев, Украина.*

*Волосатов Иван Ростиславович, младший научный сотрудник, отдел металлургии и технологии сварки высоколегированных сталей и сплавов, Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев, Украина.*

*Каховский Николай Юрьевич, научный сотрудник, отдел металлургии и технологии сварки высоколегированных сталей и сплавов, Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев, Украина, e-mail: m.kakhovskiy@gmail.com.*

*Беляев Григорий Борисович, молодший науковий співробітник, відділ металургії і технології зварювання високолегованих сталей і сплавів, Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ, Україна.*

*Волосатов Іван Ростиславович, молодший науковий співробітник, відділ металургії і технології зварювання високолегованих сталей і сплавів, Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ, Україна.*

*Каховський Микола Юрійович, науковий співробітник, відділ металургії і технології зварювання високолегованих сталей і сплавів, Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ, Україна.*

*Beliaev Grigoriy, Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine.*

*Volosatov Ivan, Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine.*

*Kakhovskiy Mykola, Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, e-mail: m.kakhovskiy@gmail.com*