

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона

БЕЛЯЄВ ГРИГОРІЙ БОРИСОВИЧ

УДК 620.186.4:621.721.011

**ВПЛИВ ДОМІШОК СІРКИ НА УТВОРЕННЯ ТРІЩИН У ЗВАРНИХ
З'ЄДНАННЯХ ЖАРОМІЦНИХ НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ**

Спеціальність 05.02.01 – Матеріалознавство

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертація є рукопис.

Робота виконана в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України

Науковий керівник: доктор технічних наук, с.н.с.
Звягінцева Ганна Віталіївна,
Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України,
м. Київ, провідний науковий співробітник відділу металургії
та технології зварювання високолегованих сталей і сплавів

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Дмитрик Віталій Володимирович,
Національний технічний університет «Харківський
політехнічний інститут» МОН України, завідувач кафедру
«Зварювання»

кандидат технічних наук, доцент
Лоскутова Тетяна Володимирівна,
Інститут матеріалознавства та зварювання ім. Є.О. Патона
Національного технічного університету України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН
України, доцент кафедри Металознавства та термічної
обробки

Захист відбудеться 12 травня 2021 р. о 12 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.182.02 при Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України за адресою: 03680, Київ-150, МСП, вул. Казимира Малевича, 11

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України за адресою: 03680, Київ-150, МСП, вул. Казимира Малевича, 11

Автореферат розісланий 8 квітня 2021 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.182.02
кандидат технічних наук



С.Г. Григоренко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Нікелеві жароміцні сплави завдяки унікальному поєднанню фізичних та механічних властивостей, які забезпечують корозійну стійкість та достатню міцність у широкому інтервалі температур, на сьогоднішній день є одним з найбільш привабливих конструкційних матеріалів атомної енергетики. Для виробництва труб парогенераторів та допоміжних конструкцій АЕС широко використовуються сплави типу Inconel. З кожним роком кількість АЕС на планеті, особливо в країнах з активно зростаючою економікою, збільшується. Високі ризики отримання електроенергії, внаслідок можливих аварій на АЕС та широкомасштабного забруднення навколишнього середовища, викликає постійний інтерес вчених до проблеми деградації властивостей конструкційних матеріалів та їх зварних з'єднань.

Деградація властивостей сплавів в процесі експлуатації конструкцій, а також при виконанні ремонтних робіт методом зварювання плавленням, може проявлятися у вигляді різкого зростання чутливості до міжзеренного окрихчення. Технологія зварювання та ремонту виробів з сплавів на нікелевій основі передбачає накладання багатопрохідних швів, що створює підвищений ризик до утворення гарячих тріщин по границях зерен. Зварювальний нагрів та термопластична деформація впливають на перерозподіл дефектів кристалічної ґратки і створюють сприятливі умови для аномального транспортування домішок з тіла зерна на його границю з утворенням сегрегації. При цьому максимальне очищення сплавів на етапі їх виготовлення від шкідливих домішок таких як S, не вирішує дану проблему.

Вивченням особливостей використання нікелевих жароміцних сплавів, здатності до зварювання, проблем деградації властивостей та їх удосконалення займалися такі вчені: J.C. Lippold, N.E. Nissley, M.G. Collins, A.J. Ramirez, К. А. Ющенко, В. С. Савченко та ін.

Міцність зчеплення між зернами сплаву визначається величиною енергії когезії границі зерна. Енергія когезії безпосередньо зв'язана з кількістю та природою домішок, які утворюють сегрегації на границі зерна, а також з параметрами та процесами, які відбуваються в об'ємі зерна сплаву: орієнтацією суміжних зерен, типу кристалічної ґратки, густиною дислокацій вздовж границі, дифузії домішок та ін.

Детальне вивчення механізмів транспортування домішкових атомів, енергетичних та структурних особливостей зниження енергії когезії границь зерен при зварюванні нікелевих сплавів є шляхом до одержання надійних конструкцій з підвищеною продуктивністю. З урахуванням всього вищезазначеного, робота, в якій будуть розглянуті експериментальні та розрахункові енергетичні параметри границі зерна з точки зору вірогідності виникнення тріщин провалу пластичності в багатопрохідних швах нікелевих сплавів типу Inconel внаслідок сегрегації атомів S, є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. «Дослідження дифузійних процесів і деградації структури та властивостей зварних з'єднань високолегованих сталей» (№ ДР 0112U001504, 2012-2016 р.р.); «Дослідження зварюваності мартенситно-старіючих, високолегованих хромонікелевих сталей, нікелевих сплавів і різнорідних з'єднань та обробка конструкційних, функціональних

і композиційних матеріалів» (№ ДР 0113U000778, 2013-2015 р.р.) і «Проведення аналізу працездатності зварних з'єднань високолегованих сталей, сплавів і кольорових металів та впливу сегрегаційних процесів на окрихчення і експлуатаційний ресурс зварних конструкцій (№ ДР 0113U003486, 2013-2015 р.р.) в рамках цільової комплексної програми досліджень НАНУ (прикладні дослідження) «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин».

Мета роботи: дослідити закономірності впливу термодформаційних процесів на енергію когезії границь зерен, що змінюється за рахунок сегрегації сірки в нікелевих жароміцних сплавах типу Inconel.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні задачі:

- дослідити обчислювальними методами вплив швидкості пластичної деформації та температури на процес взаємодії і транспортування атомів S дислокацією з тіла зерна на його границю в температурному інтервалі крихкості;

- дослідити термодинаміку границь зерен та кристалографічну орієнтацію сплавів зварювальних дротів FM52, FM52 MSS у вихідному стані та з тріщиною провалу пластичності методом термічного травлення в межах декількох зерен;

- розрахувати енергію когезії границь зерен сплавів зварювальних дротів FM52, FM52 MSS у вихідному стані та з тріщиною провалу пластичності з урахуванням кристалографічної орієнтації зерен та сегрегації атомів сірки;

- запропонувати шляхи щодо підвищення тріщиностійкості при ремонтному зварюванні у вигляді відбору основних критеріїв, що впливають на процес формування необхідного рівня енергії когезії границі зерна.

Об'єкт дослідження: багатопрохідні шви, виконані дротами з різною системою легування FM52, FM52 MSS на сплаві Inconel 690 за методикою міжнародного стандарту PVR-Test для моделювання умов утворення тріщин повторного нагріву.

Предметом дослідження є закономірності впливу деформації та температури на процес дифузії атомів сірки з тіла зерна на його границю, а також енергія когезії границі зерна як критерій тріщиностійкості.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених задач і отримання основних експериментальних та розрахункових даних використовувалися методи фізичного металознавства і методи чисельного опису фізичних явищ: оптична металографія, скануюча і трансмісійна мікроскопія, оптична світлова інтерферометрія, інструментальне автоматичне індентування, розрахункові моделі оцінки взаємодії в системі дислокація-атом. Для визначення зварюваності використовувалась методика PVR-Test з програмованою деформацією. Вплив швидкості пластичної деформації та температури на процес утворення тріщин провалу пластичності проводилися на приладі «ИМАШ-20-75» типу Gleeble.

В основу розрахунків покладено теорію балансу енергії границі зерна і енергію поверхні зерна, теорія крихкого руйнування пластичних матеріалів Гріффітса, дислокаційна модель границі зерна Ріда-Шоклі та модель взаємодії домішкового атома з крайовою дислокацією Коттрела-Білбі з додатковими уточненнями.

Наукова новизна.

- На прикладі нікелевих сплавів типу Inconel зі стабільно аустенітною структурою вперше експериментальними і теоретичними методами визначено критичні значення енергії когезії границь зерен на рівні $2,6 \text{ Дж/м}^2$, нижче якого можливе утворення тріщин при охолодженні сплавів від температури їх зварювання.

- Вперше показано, що енергія когезії вздовж однієї границі зерна може дискретно змінюватися, що пов'язується з виникненням неоднорідного розподілу сірки вздовж границі внаслідок її перерозподілу по дислокаційному механізму з об'єму зерна на границі. Теоретичними розрахунками показано, що енергія когезії границі зерна без сегрегації на ній сірки та з сегрегацією у випадку нікелевих сплавів типу Inconel складає $3,1 \dots 3,3 \text{ Дж/м}^2$ та $0,916 \dots 0,97 \text{ Дж/м}^2$, відповідно.

- Вперше показано, що температурний інтервал реалізації дислокаційного механізму дифузії складає $650 - 1050^\circ\text{C}$ і співпадає з температурним інтервалом падіння (провалу) пластичності, що є причиною виникнення тріщин провалу пластичності в зварних з'єднаннях, що досліджувались. Це зумовлено тим, що при таких температурах швидкість руху $V_{\text{кр}}$ одиничної дислокації досягає критичного рівня, при якому можливе аномально швидке транспортування атомів S.

- Розрахунковими методами встановлено, що в зоні зварного з'єднання нікелевих сплавів типу Inconel внаслідок релаксації термічних напружень підвищення густини дислокацій з $\rho \sim 10^8 \dots 10^9 \text{ см}^{-2}$ до $\rho \sim 2 \times 10^9 \dots 8 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$ в об'ємі зерна та з $\rho \sim 6 \dots 7 \times 10^9 \dots 10^{10} \text{ см}^{-2}$ до $\rho \sim 10^{11} \dots 2,2 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ вздовж границі зерна сприяють зниженню швидкості крайової дислокації та їх сукупності до рівня критичних значень $V_{\text{кр}}$ та $\dot{\epsilon}_{\text{кр}}$ при яких можливий процес швидкого транспортування атомів S з тіла зерна на його границю.

Практичне значення отриманих результатів:

- розроблена модель виникнення тріщини провалу пластичності за рахунок зниження енергії когезії границь зерен багатопрхідних швів нікелевих сплавів типу Inconel;

- розрахунковими методами визначені основні параметри, які контролюють механізм утворення тріщин провалу пластичності для багатопрхідних швів нікелевих сплавів типу Inconel;

- на основі результатів виконаних досліджень зроблені рекомендації щодо технологічних методів та прийомів попередження утворення тріщин провалу пластичності в багатопрхідних швах нікелевих сплавів типу Inconel;

- вибір режимів зварювання, які сприяють мінімізації температуро-часових та температуро-просторових параметрів процесу з'єднання, зокрема дозованим тепловкладенням;

- додаткове легування елементами, які знижують енергію дефекту пакування в температурному інтервалі провалу пластичності для сплавів типу Inconel;

- запобігання підвищення густини дислокацій та зниження їх швидкості до значень реалізації механізму захоплення і транспортування атомів домішок з тіла зерна на його границю.

Особистий внесок здобувача. Особисто автором виконувались металографічні дослідження, дослідження термодинаміки границь зерен, вимірювання мікротвердості та обробка отриманих результатів. Автор самостійно підбирав теоретичні підґрунтя, удосконалював існуючі моделі та методики експерименту і розрахунку енергії когезії границі зерна без сегрегації S та з сегрегацією S. Запропоновано модель транспортування атомів S з тіла зерна на його границю та визначено критерії реалізації цього механізму. Наукові і практичні результати дисертаційної роботи, які винесені на захист, отримані автором самостійно або у співавторстві у відповідності з публікаціями, що приведені в авторефераті.

В роботах, які було опубліковано у співавторстві, здобувачу належить наступне: підбір, аналіз та узагальнення літературних даних щодо сегрегації S в аустенітних сплавах [1]; розробка експериментальної методики та розрахунок енергії когезії, енергії границі зерна та рівня сегрегації домішкових елементів у зварних з'єднаннях [4], аналіз тріщиностійкості в температурному інтервалі провалу пластичності [6]; принципи моделювання напружено-деформованого стану в металах і сплавах [3], розрахунок деградації границь зерен нікелевих сплавів внаслідок сегрегаційних процесів [5]; дослідження впливу температурних факторів на формування структури в металі зварних з'єднань [2].

Апробація результатів дисертації. Основні наукові положення і результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на наукових конференціях і семінарах в тому числі: VII науково-технічній конференції молодих учених та спеціалістів «Зварювання та споріднені технології», 22 - 24 травня 2013 р., Київ; науковому семінарі по Європейському проекту «INNOPIPES» 21 - 29 травня 2013, Варшава; VIII міжнародній конференції молодих учених та спеціалістів «Зварювання та споріднені технології», 20 - 22 травня 2015 р., Ворзель.

Публікації. Результати досліджень по дисертації опубліковані в 8 працях, в тому числі у 6 статтях у фахових виданнях, з яких 3 роботи оприлюднені в іноземних фахових виданнях, або виданнях України, що внесені до реєстру міжнародних наукометричних баз даних.

Структура й обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступної частини, чотирьох розділів та висновків. Загальний обсяг дисертації становить 140 сторінок, вона містить 89 рисунків і 17 таблиць. Бібліографічний список складається із 110 посилань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** стисло охарактеризовано стан наукової проблематики, обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та задачі дослідження, показано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, відображено особистий внесок автора, наведено відомості про апробацію роботи.

У **першому розділі** наведено огляд літературних джерел сучасного стану питань особливостей використання сплавів на нікелевій основі системи легування Ni – Cr – Fe типу Inconel в атомній енергетиці з початку 1950-х років до теперішнього часу. Основною причиною деградації властивостей даних сплавів після зварювання плавленням є утворення тріщин провалу пластичності (ductility-dip

cracks). Схильність до утворення тріщин підвищується зі збільшенням концентрації окрихчуючих домішок в металі зварного дроту. На думку багатьох авторів основною причиною утворення тріщин провалу пластичності є дисбаланс між міжзереною та внутрішньозереною міцністю в температурному інтервалі 650 – 1050 °С унаслідок утворення сегрегації домішкових атомів.

Проаналізовано існуючі гіпотези щодо механізмів утворення гарячих тріщин, критерії оцінки тріщиностійкості та методи випробувань матеріалів. Розглянуто фактори та параметри, які впливають на сегрегацію сірки на границях зерен сплавів та її дифузію з тіла зерна на його границю. Зроблено висновок, що вплив окремих факторів на деградацію структури та руйнування нікелевих жароміцних сплавів залишається дискусійним. На базі літературного огляду сучасного стану дослідження нікелевих жароміцних сплавів обґрунтована необхідність та доцільність вивчення енергетичних та структурних особливостей формування границь зерен з високим значенням енергії когезії при зварюванні нікелевих жароміцних сплавів. Це визначило мету та завдання дослідження досліджень, вибір матеріалів та методів дослідження.

У другому розділі обґрунтовано вибір матеріалів, наведена характеристика умов отримання зварних з'єднань та модельних зразків, описані методики дослідження та моделі розрахунків енергетичних параметрів умов виникнення тріщин провалу пластичності.

Для дослідження процесу транспортування домішкових елементів з тіла зерна на його границю та енергетичних параметрів границі, зокрема енергії когезії, з метою описання механізму утворення тріщин провалу пластичності при повторному нагріві в процесі зварювання використовувалися зразки зварних з'єднань багатопрхідного наплавлення на сплав In690 дротами FM52 та FM52 MSS. Хімічний склад досліджуваних матеріалів наведено у табл. 1. Зразок з тріщиною вирізано з місця, яке піддавалося повторному нагріванню при накладанні наступного шару багатопрхідного шва мають різну схильність до утворення тріщин провалу пластичності. FM52 MSS легований Nb і Mo в сумарній кількості не більше 6 мас. % забезпечує більшу тріщиностійкість, що підтверджується дослідженнями зварюваності за стандартизованими методиками.

Як відомо з літературних джерел, основними факторами, які впливають на утворення тріщин провалу пластичності (ductility-dip cracks) в сплавах зі стабільною аустенітною структурою системи легування Ni – Cr – Fe є температура і деформація. У металі зварних з'єднань виникає пластична деформація, викликана градієнтом температури в процесі зварювання. Для підтвердження явища аномально швидкого транспортування атомів S з тіла зерна на його границю в металах та сплавах з гранецентрованою кристалічною ґраткою та апробації методики розрахунку в якості об'єкту дослідження був вибраний Nickel 200 – технічно чистий нікель (99 мас. % Ni) з розміром зерен 70 - 100 мкм. Для пояснення процесу аномально швидкого транспортування атомів S дислокацією запропонована модель Коттрела-Білбі з додатковими особистими уточненнями. Критична швидкість руху дислокаційного сегменту визначалася з урахуванням густини дислокації для зразків

у вихідному стані та після зварювання. Густина дислокацій досліджувалася на трансмісійному електронному мікроскопі.

Таблиця 1. Хімічний склад досліджуваних жароміцних нікелевих сплавів.

Сплав (дріт)	Концентрація елемента, мас. %											
	C	Mn	Ni	Cr	Fe	Nb	Mo	Ti	S	P	Al	Si
In690	0,025	0,24	59,17	29,7	10,3	-	-	0,28	0,002	0,005	0,87	0,32
FM52	0,026	0,31	59,17	28,8	8,5	0,03	0,03	0,51	0,001	0,004	0,72	0,12
FM52 MSS	0,024	0,29	54,55	30,3	7,2	2,52	3,51	0,25	0,0008	0,001	0,22	0,15

В основі розрахунків моделі взаємодії крайової дислокації з атомом S використовувалося рівняння Коттрела, удосконалене Білбі, яке дозволяє визначити вільну енергію взаємодії домішкового атома з дислокацією в кристалі:

$$U = 4 G b \frac{r_d - r}{r} r^3 \frac{\sin \alpha}{R}, \quad (1)$$

де

G – модуль зсуву, ГПа;

b – вектор Бюргерса, м;

r – радіус атома розчинника, м;

r_d – радіус атома домішки, м;

R, α – полярні координати атома домішки по відношенню до дислокації.

Для розрахунку максимальної концентрації атомів S вздовж дислокаційного сегменту використовували статистику Фермі - Дірака:

$$C = \frac{C_0 \exp\left(\frac{-U}{kT}\right)}{1 - C_0 + C_0 \exp\left(\frac{-U}{kT}\right)}, \quad (2)$$

де

C – максимальна концентрація S під екстраплощиною дислокації, ат.%;

C_0 – концентрація S в об'ємі сплаву, ат.%;

k – константа Больцмана, $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К;

T – температура системи, К;

U – вільна енергія взаємодії атома S з дислокацією, Дж.

Для визначення потенційної енергії взаємодії атома сірки з рухливою крайовою дислокацією, а саме реалізації процесу транспортування з тіла зерна на його границю в температурному інтервалі провалу пластичності $T = 650 - 1050^\circ\text{C}$, враховувався опір руху дислокації зі сторони кристалічної ґратки $F_{кр}$ та коефіцієнт об'ємної дифузії D . Значення сили опору зі сторони кристалічної ґратки розраховувалося за рівнянням Ейнштейна – Смолуховського:

$$F_{кр} = \frac{kTW}{D}, \quad (3)$$

де

W – швидкість дислокації з атомом S , м/с;

D – коефіцієнт дифузії S у сплаві типу Inconel, м²/с.

Значення коефіцієнту об'ємної дифузії D розраховувалося за рівнянням Арреніуса:

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-E_a}{k \cdot T}\right), \quad (4)$$

де

D – коефіцієнт дифузії S у сплаві типу Inconel, м²/с;

D_0 – предекспоненціальний множник;

E_a – енергія активації атома S в сплаві типу Inconel, Дж.

Зі збільшенням пластичної деформації густина дислокацій збільшується і зменшується відстань між ними. Імовірність потрапляння атомів S в поле дії дислокацій збільшується. Рухома дислокація може захоплювати за собою атоми S , лише якщо її швидкість W настільки мала, що атоми S можуть слідувати за дислокацією за допомогою дифузії.

Критична швидкість $W_{кр}$, нижче якої атмосфери повністю захоплюються рухомими дислокаціями, визначається за рівнянням:

$$W_{кр} = \frac{4D}{l}, \quad (5)$$

де

l – характеристична довжина дислокації, м;

D – коефіцієнт дифузії S у сплаві типу Inconel, м²/с.

Характеристична довжина l розраховується за формулою:

$$l = \frac{A}{KbT} = \frac{4Gb\epsilon r_D^3}{KbT}, \quad (6)$$

де

G – модуль зсуву, ГПа;

ϵ – параметр розмірної невідповідності між атомами домішки і матриці.

Методика дослідження енергії когезії границь зерен нікелевих сплавів ґрунтувалася на дислокаційній моделі границі зерна Рідлі-Шоклі та теорії крихкого руйнування пластичних матеріалів Гріффітса. Для розрахунку енергії дислокаційної границі зерна визначалась кристалографічна орієнтація зерен. З метою визначення кристалографічної розорієнтації на границі зерна за допомогою детектора вторинних електронів Еверхарта - Торнлі (EBSD) на ПЕМ Quanta 200 3D була визначена кристалографічна орієнтація зерен досліджуваної області. Основна увага приділялася висококутовим границям зерен, які згідно літературних даних є типовими для утворення тріщин провалу пластичності.

З метою прямого дослідження поверхневої дифузії границь зерен нікелевих сплавів використовувалася методика термічного травлення. Дослідження проводилося на растровому електронному мікроскопі Quanta 200 3D з функцією

нагріву зразка у вакуумній камері мікроскопа та можливістю спостереження за процесом у реальному часі. Травлення полікристалічних зразків у вакуумній камері дозволяє досліджувати кінетику дифузії границі зерна за рахунок візуальної фіксації зміни профілю канавки травлення та послідуєчого розрахункового визначення двогранного кута її розкриття як функціональної залежності енергії границі зерна від енергії поверхні зерна.

Вимірювання геометричних розмірів профілю канавки травлення границі зерна виконувалося на світловому мікроінтерферометрі ЛИННИКА МІИ-4 з урахуванням несиметричності профілю травлення. Розрахунки проводилися за методикою визначення мікрорельєфу поверхні, яка використовується для даного типу приладу.

Відповідно до теорії розколу пластичних тіл Гріффітса, швидкість виділення енергії, пов'язана з крихким розщепленням вздовж границі зерна. Іншими словами, енергія «цільної» границі зерна E_{gb} витрачається на утворення двох нових поверхонь з енергією E_s . Різниця між цими двома параметрами є енергія когезії E_{coh} , яка є критерієм міцності границі зерна:

$$E_{coh} = 2E_s - E_{gb}, \quad (7)$$

де

E_{coh} – енергія когезії, Дж/м²;

E_{gb} – енергія границі зерна, Дж/м²;

E_s – енергія поверхні зерна, Дж/м².

З урахуванням геометричних параметрів канавок травлення границі зерна, визначених на інтерферометрі, за рівнянням (8) було встановлено залежність енергії границі від енергії поверхні зерна:

$$\frac{E_{gb}}{E_s} = 2 \cos\left(\frac{\psi_s}{2}\right), \quad (8)$$

де

ψ_s – двограний кут розкриття канавки травлення границі зерна, град.

Згідно моделі Рідлі - Шоклі кристалографічна розорієнтація компенсується дислокаціями в об'ємі границі зерна і може бути виражена математично у вигляді функціональної залежності енергії ядра дислокації від кута розорієнтації:

$$E_{gb} = E_0 \theta (A - \ln \theta) \quad (9)$$

$$E_0 = \frac{\mu b}{4\pi(1-\nu)} \quad (10)$$

$$A = \frac{4\pi(1-\nu)B_k}{\mu b^2} \quad (11)$$

де

μ – модуль зсуву, ГПа;

b – вектор Бюргерса, м;

ν – коефіцієнт Пуассона;

B_k – енергія ядра дислокації, Дж;

θ – кут розорієнтації сусідніх зерен, град.

Розрахунок енергії когезії границі зерна сплаву з тріщиною провалу пластичності з урахуванням сегрегації S на поверхні зерна та на його границі:

$$E_{coh} = (2E_S + \Delta E_S^{seg} \cdot C) - (E_{gb} + \Delta E_{gb}^{seg} \cdot C), \quad (12)$$

де

ΔE_{gb}^{seg} - енергія сегрегації S (eВ/атом) на ГЗ;

ΔE_S^{seg} - енергія сегрегації S на поверхні зерна атома (eВ/атом);

C – концентрація S , атом/нм².

З метою оцінки впливу дислокаційної мікроструктури на величину пружних констант дротів FM52 та FM52 MSS у вихідному стані та зразка з тріщиною провалу пластичності, виконаного зварюванням плавленням на сплаві In 690 з присадкою дроту FM 52, де метал повторно нагрівався, було визначено мікротвердість в об'ємі зерен та у приграничних ділянках. Дослідження проводилося за допомогою мікротвердоміру «DuraScan 20» та «Микрон-гамма».

У **третьому розділі** представлені експериментальні та розрахункові дані впливу температури і пластичної деформації на процес утворення тріщин провалу пластичності у багатопрхідних швах, виконаних дротами з різною системою легування FM52, FM52 MSS на сплаві Inconel 690 внаслідок сегрегації атомів S .

Наявність крихкого руйнування металів та сплавів з ГЦК граткою при певних термодформаційних умовах свідчить про наявність провалу пластичності. Для підтвердження явища аномально швидкого транспортування атомів S з тіла зерна на його границю та апробації методики розрахунку в якості об'єкту дослідження був обраний Nickel 200 – технічно чистий нікель (99 % Ni) з розміром зерен 70 – 100 мкм, поверхня якого була насичена S з газової фази. Крихке руйнування спостерігається при температурі 500 °С, особливо для низьких швидкостей деформації $\dot{\epsilon} = 0,29 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$. Зростання швидкості деформації до $\dot{\epsilon} = 1,83 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$ зменшує площу крихкого руйнування на зломі, а також збільшує відносне видовження та звуження зразків (рис. 1 а, б).

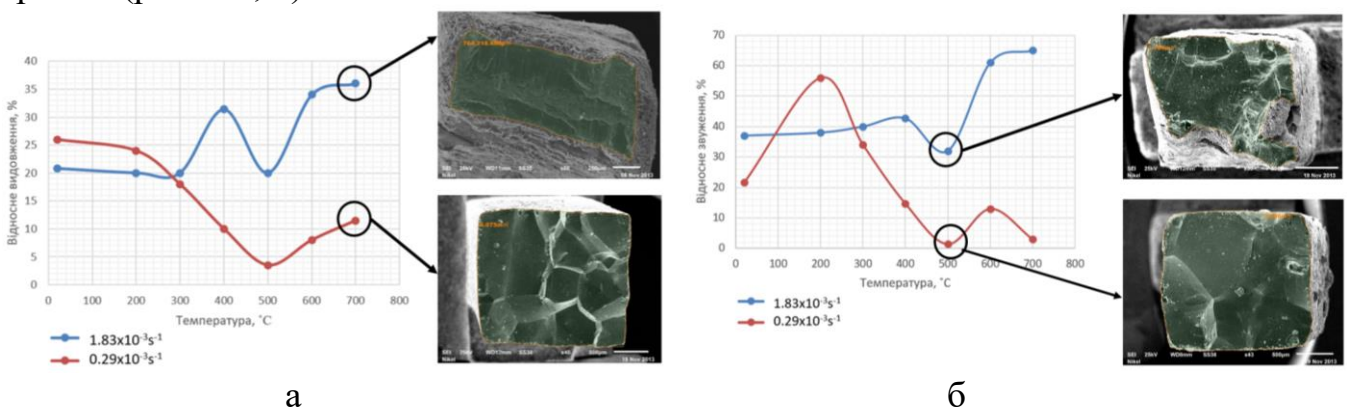


Рис.1. Графіки механічних випробувань нікелевих зразків з електронними зображеннями зламів, утворених при $T = 500, 700^\circ\text{C}$: а – залежність відносного видовження від температури; б – залежність відносного звуження від температури.

При низьких температурах ймовірність потрапляння атомів S у поле дії крайової дислокації незначна через низьку концентрацію вакансій в об'ємі сплаву. При високих температурах $T > 1000^\circ\text{C}$ сплав достатньо насичений вакансіями і акумуляції S вздовж лінії дислокації не відбувається. В інтервалі температур

від 700 до 1000°C атомам сірки енергетично вигідно акумулюватися вздовж дислокаційного сегменту із-за наявності вільного об'єму та енергетичного поля тяжіння зі сторони ядра дислокації, а достатній при цих температурах коефіцієнт об'ємної дифузії може забезпечити цей процес насичення.

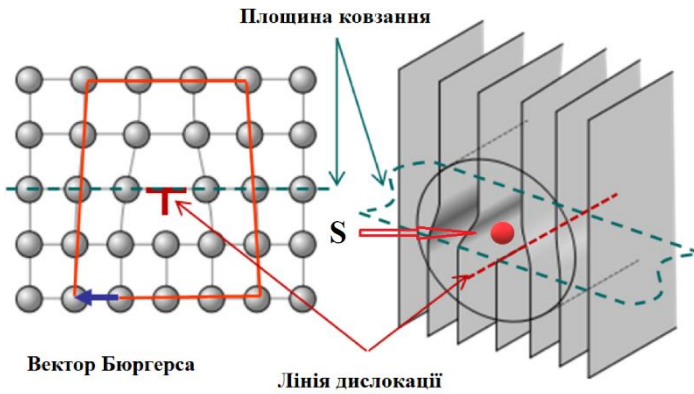


Рис. 2. Схематичне зображення атома S під екстраплощиною крайової дислокації.

Для розрахунку енергії взаємодії атома S з крайовою дислокацією значення радіус вектора R обирають з міркувань, що S розташовується під екстраплощиною крайової дислокації. Середнє значення радіус-вектора обирають як половину періоду кристалічної ґратки нікелю $R = a/2$. Найбільш міцний зв'язок атома S з полем тяжіння крайової дислокації створюється в положенні $\alpha = \frac{3\pi}{2}$.

При виконанні наплавки дротом FM52 MSS з додатковим легуванням Nb та Mo утворення тріщин провалу пластичності не відбувається (рис. 3). За рахунок зниження енергії дефекту пакування густина дислокацій після зварювання суттєво не змінюється. В той час, як при використанні дроту FM52 густина дислокацій збільшується в об'ємі зерна та у приграничних ділянках, що призводить до зменшення швидкості одиничних дислокацій. Створюються сприятливі умови для транспортування атомів S, а підвищення коефіцієнту об'ємної дифузії до можливості насичення «вільного» об'єму під екстраплощиною дислокації.

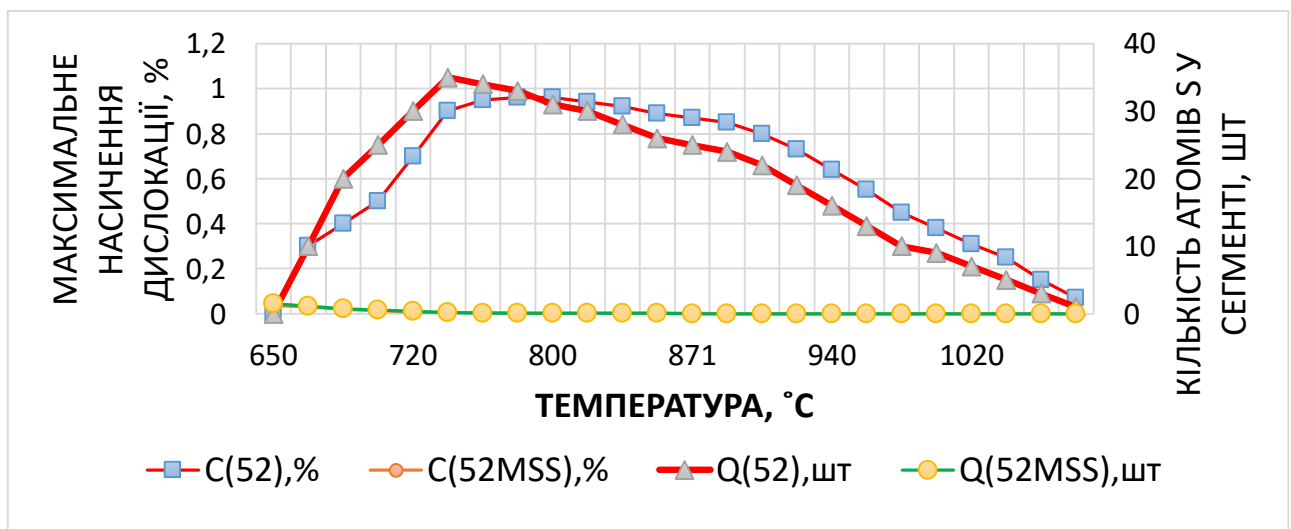


Рис. 3. Максимальне насичення крайової дислокації в залежності від температури.

На рис. 4 зображено графік потенційної можливості транспортування атомів S крайовою дислокацією в температурному інтервалі $T = 20 - 1150 \text{ }^\circ\text{C}$ в залежності від відносної швидкості пластичної деформації в суміжних зернах, які утворюють границю зерна з тріщиною провалу пластичності. Аналіз, приведених розрахункових даних показує, що потенційна можливість транспортування S дислокацією відбувається за умови підвищеної густини дислокацій, внаслідок зменшення критичної швидкості їх руху, що спостерігається при використанні дроту FM52. Насичення дислокацій атомами S починається при $T = 650 \text{ }^\circ\text{C}$ і досягає свого максимального значення при $T = 800 \text{ }^\circ\text{C}$. При більших температурах відсоток насичення зменшується внаслідок підвищення коефіцієнту об'ємної дифузії або, іншими словами, градієнту «вільного» об'єму в сплавi. Максимальний відсоток насичення відповідає температурному інтервалу провалу пластичності $T = 700 - 900 \text{ }^\circ\text{C}$ для зварних з'єднань багатопрохідного наплавлення на сплав In690 дротом FM52 та утворенню тріщин провалу пластичності.

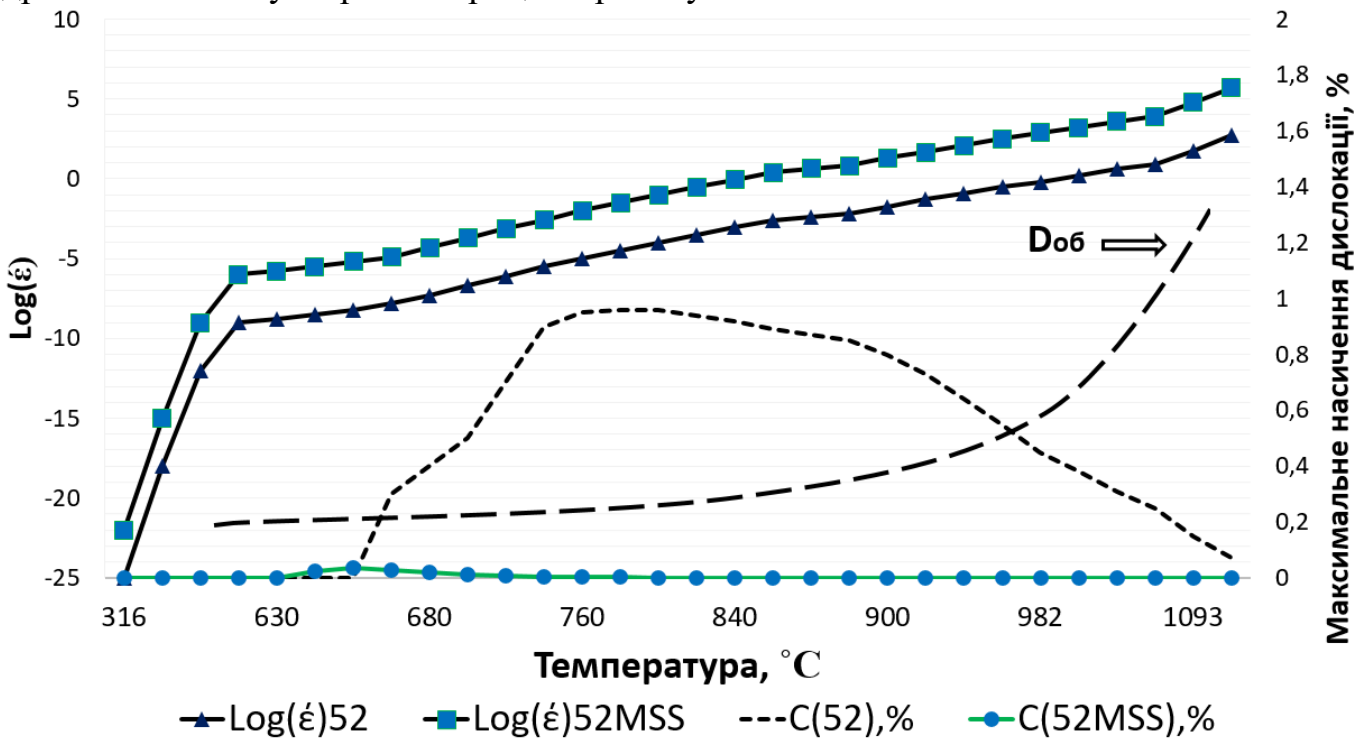


Рис. 4. Відносна швидкість деформації в зернах сплаву та максимальна концентрація S вздовж дислокації в залежності від T для дротів FM52 та FM52 MSS.

- $\text{Log}(\dot{\epsilon})_{52}$ – відносна швидкість деформації в зернах при використанні дроту FM52, яка рівна або менша відносної критичної швидкості пластичної деформації, $1/\text{c}$;
- $\text{Log}(\dot{\epsilon})_{52MSS}$ – відносна швидкість деформації в зернах при використанні дроту FM52MSS, $1/\text{c}$;
- $C(52)$ – відсоток максимального насичення дислокаційного сегменту при використанні дроту FM52, %;
- $C(52MSS)$ – відсоток максимального насичення дислокаційного сегменту при використанні дроту FM52MSS, %.

Таким чином, розрахунковим методом з урахуванням експериментальних даних густини дислокації в наплавках, виконаних дротами FM52 та FM52 MSS на сплаві Inconel 690, встановлено, що критична швидкість руху $W_{кр}$ одиничної дислокації та відносна швидкість дислокаційних скупчень $\dot{\epsilon}_{кр}$ при яких можливе захоплення та транспортування атомів S у температурному інтервалі $T = 760 - 860^\circ\text{C}$ становить: $W_{кр} = 1,3 \cdot 10^{-6} \dots 1,5 \cdot 10^{-5}$ м/с, $\dot{\epsilon}_{кр} = 6,7 \cdot 10^{-3} \dots 0,074$ 1/с. Збільшення густини дислокацій з $\rho \sim 10^8 \dots 10^9 \text{ см}^{-2}$ до $\rho \sim 2 \times 10^9 \dots 8 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$ в об'ємі зерна та з $\rho \sim 6 \dots 7 \times 10^9 \dots 10^{10} \text{ см}^{-2}$ до $\rho \sim 10^{11} \dots 2,2 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ вздовж границі зерна призводить до зниження швидкості крайової дислокації та їх сукупності до рівня критичних значень $W_{кр}$ та $\dot{\epsilon}_{кр}$. Результатом цього є утворення тріщин провалу пластичності в об'ємах металу, які піддаються повторному нагріву при накладанні наступного шва. В табл. 2 наведено розрахункові значення відносної пластичної деформації в зернах зразків, виконаних дротами FM52 та FM52 MSS.

Таблиця 2. Розрахункові значення відносної швидкості деформації в зернах наплавок.

T, °C	ϵ (FM52), 1/с	ϵ (FM52 MSS), 1/с
760	$6,7 \cdot 10^{-3}$	0,13
780	$1,1 \cdot 10^{-2}$	0,22
800	0,018	0,37
820	0,03	0,6
840	0,047	0,9

При накладанні багатопрхідного шва дротом FM52 максимальна T насичення та концентрація S вздовж крайової дислокації становить: $T=760^\circ\text{C}$ і $Q = 30 \dots 36$ атомів/дисл, відповідно. Температурний інтервал початку і закінчення процесу насичення становить: 650°C та 1050°C , відповідно.

У **четвертому розділі** наведені результати досліджень енергії когезії границь зерен зварних з'єднань, що отримані багатопрхідним наплавленням з використанням дротів різних систем легування FM52, FM52 MSS на сплаві Inconel 690 з урахуванням сегрегації атомів S на границях зерен.

Візуальним спостереженням травлення границь зерен встановлено, що кінетика травлення границь залежить від кута розорієнтації. Чим більший кут розорієнтації, тим більша ширина канавки травлення: $29,5^\circ - 452,4 \text{ нм}$, $33,1^\circ - 502,4 \text{ нм}$; близько $60^\circ - 881,0 \text{ нм}$ (рис.5).

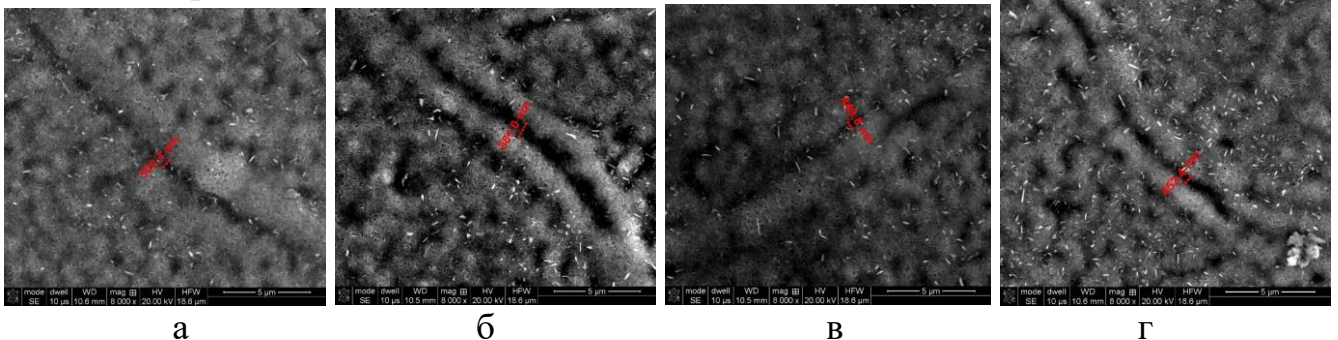


Рис. 5. Електронне зображення границь зерен сплаву дроту FM52 MSS безпосередньо в процесі травлення при збільшенні у 8000X: 502,4 нм (а); 881,0 нм (б); 449,8 нм (в); 452,4 нм (г).

Дослідження кристалографічної орієнтації зерен проводилося у поміченому полі зору з загальною довжиною границь зерен: 1,09 см і 1,04 см у вихідному стані для сплаву дротів FM52 і FM52 MSS, відповідно. В основному це великокутові границі зерен з кутом розорієнтації від 25° до 60°. Дослідженням сплаву швів виконаних дротом FM52 встановлено, тріщини провалу пластичності утворилися на висококутових границях зерен наплавки з кутами розорієнтації 45 - 55°.

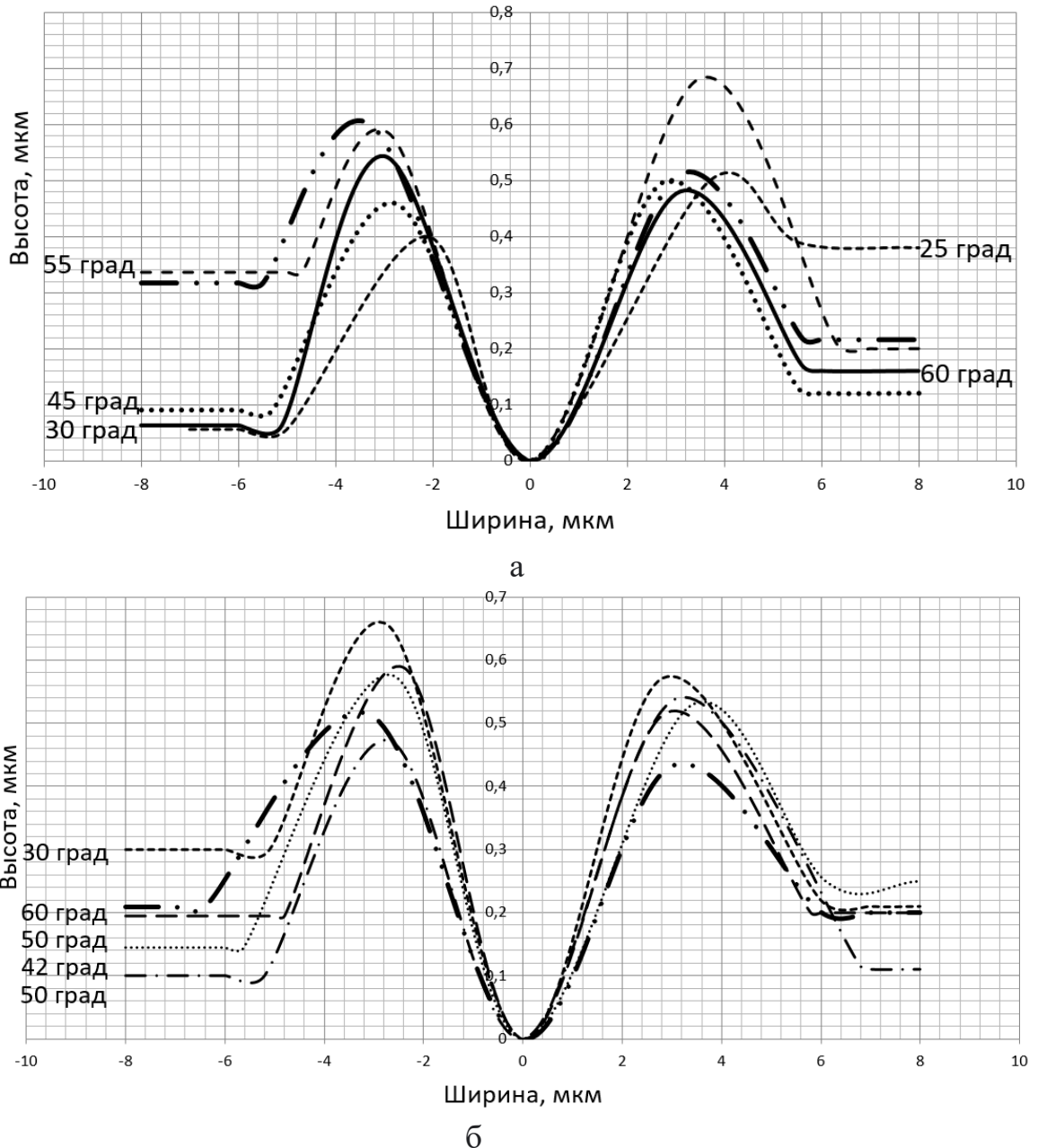


Рис. 6. Схематичне зображення переріз границь зерен після травлення: а - дріт FM52, б - дріт FM52 MSS.

Схематичні профілі канавок травлення границь зерен в залежності від кута кристалографічної розорієнтації зображено на рис. 6. При дослідженні зразків з тріщиною провалу пластичності розраховувалися лише ті інтерференційні лінії, які мали нерозривну криву профілю і гостру вершину у «жолобі» канавки травлення.

Інтер-ференційні лінії, які розривалися, свідчили про те, що в даному місці знаходиться поверхня розколу (тріщина).

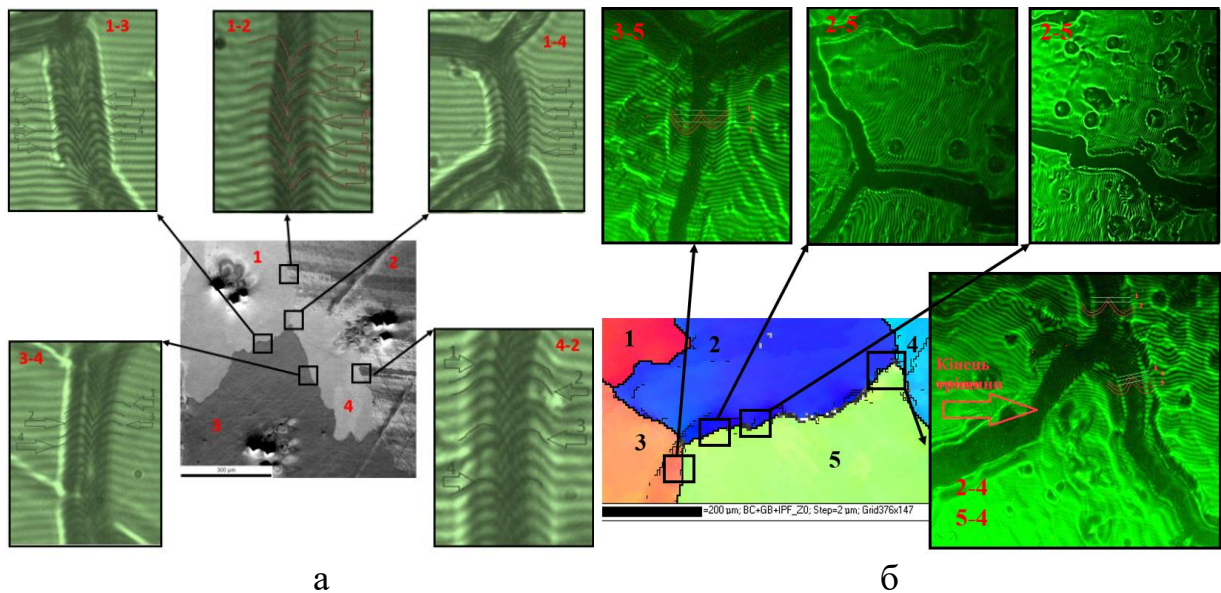


Рис. 7. Зображення накладання інтерференційних ліній на границі зерна після термічного травлення: а – зразок FM52 у вихідному стані, б – зразок наплавки, виконаної дротом FM52, з тріщиною провалу пластичності.

На рис. 7 зображено фотографії накладення інтерференційних ліній, за якими розраховувалося відношення енергії поверхні зерна до енергії границі зерна. В процесі розрахунку спостерігалась несиметричність відносно площини границі зерна, а також нерівномірність перерізу канавки травлення вздовж однієї границі зерна і в межах однієї кристалографічної розорієнтації. На границях зерен наплавки дротом FM52 з тріщинами провалу пластичності спостерігаються локальні розриви границі зерна, що можна пояснити наявністю локальних ділянок у межах двох зерен з різною енергією когезії. Енергія когезії залежить від акумуляції дислокаційних сходинок (ділянок виходу крайової дислокації на поверхню зерна), сегрегації атомів S, кількості співпадаючих вузлів згідно моделі дислокаційної границі зерна, яка залежить від кристалографічної розорієнтації та ін.

Встановлено, що у вихідному стані значення енергій когезії сплавів дротів FM52 та FM52 MSS в залежності від кута кристалографічної розорієнтації змінюються не суттєво. Підвищення температури системи в процесі зварювання та, як результату, виникненні термомеханічних напружень, призводить до аномально швидкого транспортування атомів S, перерозподілу дислокацій та утворенню сегрегацій. Спостерігається дискретність енергії когезії однієї границі зерна в залежності від питомої концентрації S та напруженого-деформованого стану вздовж границі зерна. Для розрахунку впливу сегрегації S на енергію когезії границь зерен сплаву з тріщиною провалу пластичності використовувалися літературні експериментальні дані, отримані на Оже-спектрометрі після моделювання багатошарової наплавки дротом FM52 на спеціально підготовленій пластині зі сплаву Inconel 690 методом

Varestraint - Test. Умови моделювання зварювання та матеріали відповідають умовам отримання експериментальних зразків в даній роботі.

Попередня оцінка густини дислокацій в приграничних ділянках наплавки після використання дроту FM52 показала зростання густини з $2 \times 10^9 \text{ см}^{-2}$ до $2 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Порівнюючи ці дані з розрахунково-експериментальними даними, отриманими з аналізу профілю канавок травлення, можна зробити висновок, що нерівномірний розподіл дислокацій вздовж границь зерен впливає на енергію когезії границі зерна. Створені локальним нагрівом дотичні напруження в об'ємі зерна контролюють процес дифузії та сегрегації атомів S.

Для розрахунку енергії когезії з урахуванням сегрегації S використовувалися експериментальні дані, отримані при вимірі профілей канавок травлення на кінці тріщини провалу пластичності. Розрахунково-експериментальними методами встановлено, що в місцях зупинки тріщини провалу пластичності на висококутовій границі зерна наплавки після використання дроту FM52 енергія когезії знижується з $3,22 \text{ Дж/м}^2$ до $2,7 \text{ Дж/м}^2$.

Розраховувалися 2 типові тріщини з кристалографічною розорієнтацією 45° та 55° . Враховуючи різницю у локальній концентрації S на поверхні тріщини, спостерігалася різниця у значеннях енергії когезії. Було розраховано по три значення енергії когезії E_{coh} для кожної тріщини та для кожної локальної концентрації S.

Аналіз отриманих розрахунково-експериментальних даних пояснює дискретність енергії когезії границі зерна безпосередньо перед початком утворення та росту тріщини повторного нагріву. Найвища питома концентрація сірки 18 ат.% спостерігається на поверхнях тріщини з хімічним складом елементів, що відповідає об'ємній концентрації в зерні. Найнижча енергія когезії локальної ділянки границі зерна спостерігається у місці локалізації карбідів хрому і складає близько $E_{coh} = 0,916 \dots 0,97 \text{ Дж/м}^2$ для кутів розорієнтації 45° та 55° , відповідно.

Енергія когезії на ділянках з підвищеною концентрацією титану близька до значень енергії когезії, розрахованого у місцях зупинки тріщини провалу пластичності і становить $E_{coh} = 2,28 \dots 2,4 \text{ Дж/м}^2$. В табл. 3 наведено експериментально-розрахункові значення енергії когезії для трьох ділянок з різними концентраціями сірки та інших елементів сплаву.

На рис. 8 зображено графік залежності енергії когезії границі зерна від кута розорієнтації границь зерен наплавки з тріщинами провалу пластичності після використання дроту FM52. Для оцінки величини зниження енергії когезії після зварювання на графіку відображено енергію когезії сплаву дроту FM52 у вихідному стані $E_{coh} = 3,2 \dots 3,26 \text{ Дж/м}^2$. Дані енергії когезії різняться в залежності від питомої концентрації S на поверхні тріщини провалу пластичності. Згідно даних, отриманих на ОЖЕ-спектрометрі після руйнування зразка безпосередньо у камері приладу, концентрація S на поверхні тріщини провалу пластичності різна і залежить від концентрації інших елементів. Середнє значення енергії когезії в межах однієї границі зерна складає близько $E_{coh} = 1,76 \dots 1,85 \text{ Дж/м}^2$ для кутів розорієнтації 45° та 55° , відповідно.

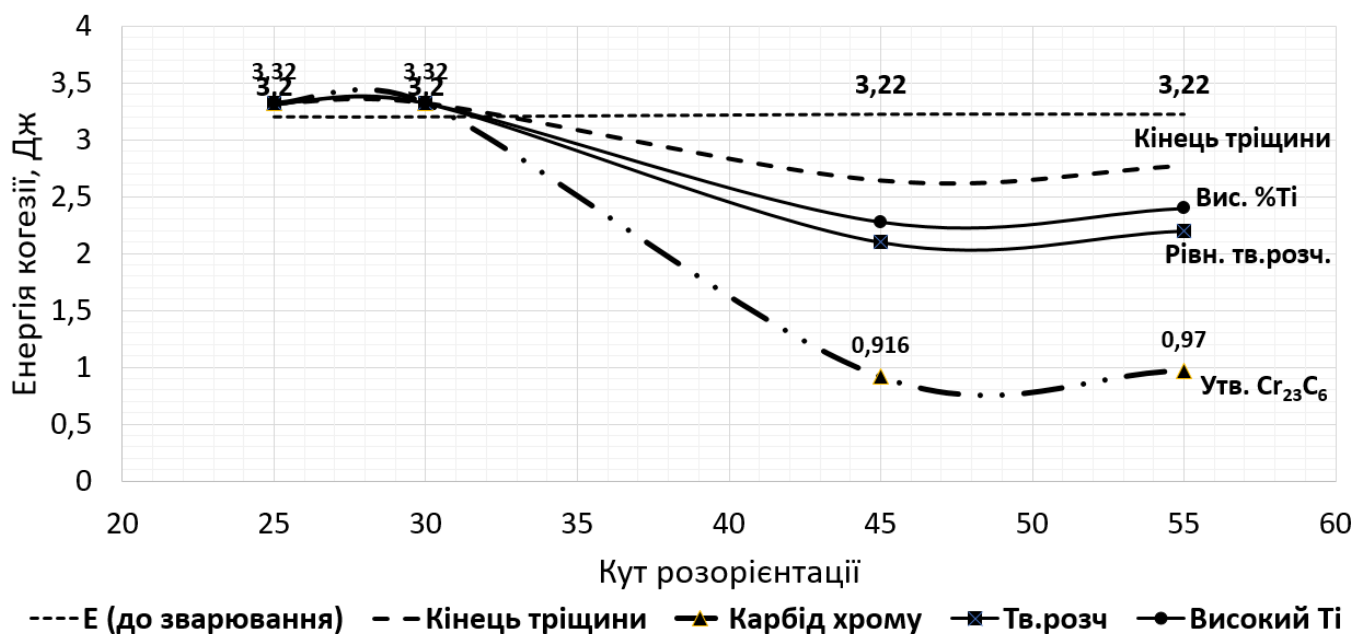


Рис. 8. Значення енергії когезії границі зерна з тріщиною провалу пластичності в залежності від кристалографічної розорієнтації.

Таким чином, за результатами проведених досліджень визначено, що процес утворення тріщин провалу пластичності в багато прохідних зварних швах, виконаних дротами FM52 та FM52 MSS на сплаві Inconel 690 контролюється дефектами кристалічної ґратки та сегрегацією атомів S на висококутових границях зерен. Процеси доповнюють один одного і результатом їх реалізації є зниження енергії когезії до критичних значень при яких можливе утворення і розповсюдження тріщин провалу пластичності.

Таблиця 3. Експериментально-розрахункові значення E_{coh} границі зерна багатосферової наплавки з тріщинами провалу пластичності (ТПП), виконаної дротом FM52.

Локалізація S	C (S), ат.%	Θ, град	E_{coh} , Дж/м ²
Cr ₂₃ C ₆ + S	12	45°	0,916
		55°	0,97
Тв. розч. + S	18	45°	2,1
		55°	2,2
(C _{max} Ti) + S	13	45°	2,28
		55°	2,4
Кінець ТПП	-	45°	2,64
		55°	2,77

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Сукупність теоретичних положень та розрахунково-експериментальних розробок, що представлені в дисертаційній роботі, може бути кваліфікована як вирішення науково-технічної задачі в області матеріалознавства нікелевих жароміцних сплавів та їх зварних з'єднань.

2. Досліджено механізм утворення тріщин провалу пластичності, викликаних сегрегацією S на границях зерен багатопрохідних швів, виконаних дротами FM52 та додатково легованого ($Nb + Mo$) FM52 MSS на сплаві Inconel 690.

3. Максимальне зниження енергії з $3,22 \text{ Дж/м}^2$ до $2,7 \text{ Дж/м}^2$ фіксується в місцях зупинки тріщини, які зафіксовано на висококутових границях зерен з кутом розорієнтації $45 - 55^\circ$

4. Критична швидкість руху $V_{кр}$ одиничної дислокації при якій можливе аномально швидке транспортування атомів S та відносна швидкість дислокацій $\dot{\epsilon}_{кр}$, які приймають участь в процесі в інтервалі $T = 760 - 860^\circ\text{C}$ становить: $V_{кр} = 1,3 \cdot 10^{-6} \dots 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$, $\dot{\epsilon}_{кр} = 6,7 \cdot 10^{-3} \dots 0,074 \text{ 1/с}$.

5. Утворення тріщин відбувається при наявності двох основних процесів, які доповнюють один одного: наявність підвищеної щільності дислокацій в зерні, що бере участь в процесі формування тріщини, яка забезпечує аномально швидке транспортування атомів S з величиною критичної швидкості руху дислокації: $V_{кр} = 1,3 \cdot 10^{-6} \dots 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$ та зниження енергії когезії висококутових границь зерен за рахунок сегрегації атомів S до значень $E_{coh} = 0,916 \dots 0,97 \text{ Дж/м}^2$.

6. При низьких $T < 700^\circ\text{C}$ атом S не потрапляє у поле дії крайової дислокації через низький коефіцієнт об'ємної дифузії. При високих температурах $T > 1000^\circ\text{C}$ сплав достатньо насичений вакансіями і S не акумулюється під екстраплощиною дислокації.

7. В інтервалі температур від 700 до 1000°C атомам S енергетично вигідно акумулюватися вздовж дислокації за умови її швидкості менше $V_{кр} = 1,3 \cdot 10^{-6} \dots 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$.

8. При однакових режимах зварювання при випробуванні на PVR-Test підвищення густини дислокацій з $\rho \sim 10^8 \dots 10^9 \text{ см}^{-2}$ до $\rho \sim 2 \times 10^9 \dots 8 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$ в об'ємі зерна та з $\rho \sim 6 \dots 7 \times 10^9 \dots 10^{10} \text{ см}^{-2}$ до $\rho \sim 10^{11} \dots 2,2 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ вздовж границі зерна призводить до зниження швидкості крайової дислокації та їх сукупності до рівня критичних значень $V_{кр}$ та $\dot{\epsilon}_{кр}$ при яких можливий процес швидкого транспортування атомів S з тіла зерна на його границю.

9. Температура максимального насичення та концентрація S вздовж крайової дислокації становить: $T = 760^\circ\text{C}$ і $Q = 30 \dots 36$ атомів/дисл, а температурний інтервал початку і закінчення процесу насичення: 650°C та 1050°C , відповідно та співпадає з температурним інтервалом утворення тріщин провалу пластичності для досліджених сплавів.

10. У металі зварних швів, виконаних дротом FM52 MSS, провал пластичності в температурному інтервалі $T = 700 \dots 1000^\circ\text{C}$ незначний, внаслідок додаткового легування Nb та Mo , що запобігає підвищенню густини дислокацій та зменшення їх швидкості до рівня $V_{кр}$.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ

1. К.А. Ющенко, В.С. Савченко, Г.В. Звягінцева, С.І. Сидоренко, С.М. Волошко, Ю.В. Нестеренко, І.А. Владимирський, Г.Б. Беляєв

Дифузія та сегрегація сірки в сталі Х20Н16АГ6 за умов високотемпературного відпалу та одновісного розтягу в насичуючому середовищі. Частина I. Дифузія сірки в сталі Х20Н16АГ6 при високотемпературній термічній обробці в насичуючому середовищі. *Металофізика і новітні технології*. 2011. №6(33). С. 731-740. (Scopus).

2. Каховский Н.Ю., Максимов С.Ю., Фадеева Г.В., Супрун С.А., **Беляев Г.Б.** Исследование влияния фторидов на стабильность горения дуги при сварке высоколегированных коррозионностойких сталей типа 18-10. *Збірник наукових праць «Вісник Донбаської державної машинобудівної академії»*. 2014. №2(33). С. 18-22.

3. J. Malachowski, V. Hutsaylyuk, P. Yukhumets, R. Dmitryenko, **G. Beliaiev**, I. Prudkii. Investigation of the stress-strain state of seamless pipe in the initial state. *Archive of Mechanical Engineering*. 2014. №4(61). P. 585-607. DOI: 10.2478/meceng-2014-0034. (Scopus).

4. **Beliaiev G.**, Volosatov I., Kakhovskyi M. Causes of ductility-dip cracks formation in IN52 and IN52 MSS alloys during fusion welding. *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*. 2015. №1(1). P. 113-124.

5. **Беляев Г.Б.**, Волосатов И.Р., Каховский Н.Ю. Влияние многопроходной сварки плавлением на энергию границ зерен никелевых сплавов. *Технологический аудит и резервы производства*. 2015. №5/7(25). С. 27-30.

6. К.А. Ющенко, Г.В. Звягінцева, **Г.Б. Беляев**, М.О. Червяков, І.Р. Волосатов, М.Ю. Каховский, Ю.В. Олійник. Энергетические параметры образования трещин при многопроходной сварке сплавов систем легирования Ni—Cr—Fe. *Металофізика і новітні технології*. 2016. №11(38). С.1513-1526. (Scopus).

7. **Беляев Г.Б.**, Волосатов І.Р. Математическое описание образования трещин провала пластичности при сварке плавлением сплавов с ГЦК-решеткой. *VII-ої науково-технічної конференції молодих учених та спеціалістів «Зварювання та споріднені технології»*, Україна, Київ, 22–24 травня. 2013 р. Київ: Збірка тезисів, 2013.

8. **Беляев Г.Б.**, Каховский Н.Ю. Исследование механизма образования подваликовых трещин провала пластичности в сплавах на никелевой основе. *VIII-ої міжнародної конференції молодих учених та спеціалістів «Зварювання та споріднені технології»*, Україна, Київ, 20–22 травня. 2015 р. Київ: Збірка тезисів, 2015.

АНОТАЦІЯ

Беляев Г.Б. Вплив домішок сірки на утворення тріщин у зварних з'єднаннях жароміцних нікелевих сплавів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступення кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – Матеріалознавство. – Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ, 2021.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню впливу домішок сірки на енергію когезії границь зерен сплавів як критерію утворення тріщин провалу пластичності у зварних з'єднаннях сплаву типу Inconel при накладанні багатошарових швів, а також

впливу термопластичної деформації як передумови до аномально швидкого транспортування атомів сірки з тіла зерна сплаву на його границю.

Встановлено, що сегрегація сірки на висококутових границях зерен сплавів знижує енергію когезії з $3,1 \dots 3,3$ Дж/м² до $0,916 \dots 0,97$ Дж/м² в температурному інтервалі провалу пластичності $T = 650 - 1050$ °С при якому реалізується дислокаційний механізм аномально швидкого транспортування атомів S в процесі накладання послідуєчого шва дротом FM52.

Експериментально-розрахунковими методами встановлено, що підвищення швидкості дислокацій за рахунок запобігання збільшенню їх густини та рівномірного розподілу знижує чутливість до утворення тріщин провалу пластичності в нікелевих жароміцних сплавах типу Inconel.

Ключові слова: нікелеві жароміцні сплави, тріщина провалу пластичності, енергія когезії, густина дислокацій, границя зерна, кристалографічна орієнтація, сірка, енергія дефекту пакування, швидкість дислокації.

THE ABSTRACT

Beliaiev G.B. Influence of sulfur impurities on cracks formation in welded joints of heat-resistant nickel alloys.

The thesis for scientific degree of Cand. Tech. Sci. (Eng.) on specialty 05.02.01 – Materials Science – E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, 2021.

The dissertation work is devoted to the study of the influence of sulfur impurities on the cohesion energy of grain boundaries in alloys as a criterion formation of ductility-dip cracks in welded joints in Inconel alloys when multi-ball welds are applied and the effect of thermoplastic deformation as a precondition for anomalously rapid movement of sulfur atoms from the grain to grain boundary.

It has been established that the segregation of sulfur on high-angle grain boundaries of alloys reduces the cohesion energy from $3.1 \dots 3.3$ J/m² to $0.916 \dots 0.97$ J/m² in the temperature range of the ductility dip $T = 650 - 1050$ °C at which the dislocation mechanism is realized anomalously fast transfer S atoms during the application of a subsequent weld with FM52 wire. It has been established by experimental and computational methods that an increase the velocity of dislocations by preventing increase their density and uniform distribution reduces the sensitivity to the formation of ductility-dip cracks in high-resistance nickel alloys type as Inconel.

Keywords: high-resistance nickel alloys, ductility dip cracks, cohesion energy, dislocation density, grain boundary, crystallographic orientation, sulfur, stacking fault energy, dislocation velocity.

Підписано до друку 06.04.2021 р. Формат 60x90¹/16

Ум. друк. арк. 0,9. Обл.-вид. арк. 0,9

Наклад 110 прим. Замовлення № 648.

Віддруковано на ризографі в видавничому центрі «Принт-центр»

04053, м. Київ, вул. Січових Стрільців, 26А

Тел./факс: 486-50-88, (050)712-40-80, (097)182-07-07, 277-40-16

<http://www.printc.kiev.ua>; E-mail: printcentr@ukr.net