

29. 04 2024 813

## ВІДГУК

офіційного опонента д-ра техн. наук **В.В. Дмитрика**  
на дисертаційну роботу **Григорія Борисовича Беляєва**  
**«Вплив домішок сірки на утворення тріщин у зварних з'єднаннях**  
**жароміцних нікелевих сплавів»,**  
представлену на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук  
за спеціальністю 05.02.01 – «Матеріалознавство»

### 1. Актуальність теми

Для виробництва труб парогенераторів та допоміжних конструкцій АЕС широко використовуються сплави типу Inconel. Деградація властивостей цих сплавів в процесі експлуатації конструкцій, а також при виконанні ремонтних робіт методом зварювання плавленням, може проявлятися у вигляді різкого зростання чутливості до міжзеренного окрихчення. При накладанні багатопрохідних швів у процесі зварювання термопластична деформація впливає на перерозподіл дефектів кристалічної ґратки, створюючи сприятливі умови для сегрегації шкідливих домішок на границях зерен та підвищує схильність до утворення гарячих тріщин на границях зерен.

Детальне вивчення механізмів транспортування домішкових атомів, енергетичних та структурних особливостей зниження енергії когезії границь зерен при зварюванні нікелевих сплавів є шляхом до зниження чутливості до міжзеренного окрихчення, утворення тріщин провалу пластичності та одержання надійних конструкцій з підвищеною продуктивністю.

Актуальність теми підтверджується виконаним комплексом науково-дослідних робіт в ІЕЗ ім. Є.О. Патона, а саме: «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».

## 2. Наукова новизна одержаних результатів

В якості нових наукових результатів можна визначити наступне:

- 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 Дж/м<sup>2</sup>, 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...3,3 Дж/м<sup>2</sup> та 0,916...0,97 Дж/м<sup>2</sup>, відповідно.

- вперше показано, що температурний інтервал реалізації дислокаційного механізму дифузії складає 650 - 1050°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  $V_{кр}$  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  $V_{кр}$  та  $\dot{\epsilon}_{кр}$  при яких можливий процес швидкого транспортування атомів  $S$  з тіла зерна на його границю.

### 3. Практична цінність роботи

За результатами виконаних дисертантом досліджень розроблена модель виникнення тріщини провалу пластичності за рахунок зниження енергії когезії границь зерен багатопрохідних швів нікелевих сплавів типу Inconel та розраховано основні параметри механізму.

На основі результатів виконаних досліджень зроблені рекомендації щодо технологічних методів та прийомів попередження утворення тріщин провалу пластичності в багатопрохідних швах нікелевих сплавів типу Inconel.

### 4. Структура та зміст дисертації

Дисертація та автореферат містять усі необхідні структурні розділи, написані українською мовою й оформлені відповідно до вимог ДАК України.

Дисертаційну роботу виконано в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. Робота складається з реферату, змісту, вступу, чотирьох розділів, висновку та списку використаних джерел, викладена на 140 сторінках друкованого тексту, включає 89 рисунків, 17 таблиць та 110 використаних джерела.

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. 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.

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 багатопрохідного наплавлення на сплав In690 дротами FM52 та FM52 MSS.

У третьому розділі представлені експериментальні та розрахункові дані впливу температури і пластичної деформації на процес утворення тріщин провалу пластичності в чистому нікелі та багатопрохідних швах, виконаних дротами з різною системою легування FM52, FM52 MSS на сплаві Inconel 690, як результат сегрегації атомів сірки з середини зерна на границю зерна.

У четвертому розділі наведені результати досліджень енергії когезії границь зерен зварних з'єднань, що отримані багатопрохідним наплавленням з використанням дротів різних систем легування FM52, FM52 MSS на сплаві Inconel 690 з урахуванням сегрегації атомів S на границях зерен. За результатами проведених досліджень визначено, що процес утворення тріщин провалу пластичності в указаних багатопрохідних зварних швах, контролюється дефектами кристалічної ґратки та сегрегацією атомів сірки на висококутових границях зерен.

**Висновки дисертації** повністю відображають найважливіші наукові та практичні результати дисертації. Вони сформульовані конкретно та логічно, відповідно до змісту дисертації.

**Зміст дисертації та автореферату ідентичний.** Автореферат дисертації достатньо повно висвітлює результати, наведені в самій дисертації.

### **5. Зауваження по дисертаційній роботі**

1. У розділі 1 не наведено існуючі на сьогоднішній день механізми дифузії домішок в металах і сплавах та недостатньо обґрунтовано вибір дислокаційного механізму дифузії.

2. В роботі нечітко описано переваги використання для розрахунків модель дислокаційної границі зерна.

3. У розділі 3 не приведена кількісна оцінка впливу швидкості пластичної деформації на коефіцієнт дифузії сірки у зразках з технічно чистого нікелю при моделюванні процесу провалу пластичності.

4. У розділі 3 не наведено розрахункову залежність енергії дефекту пакування від енергії пластичної деформації, яка описувалася у 2 розділі роботи.

5. У роботі зустрічаються окремі граматичні помилки за текстом, русизми та неточності використання термінології, а саме: «жолоб тріщини», «пагорби канавки травлення» тощо.

### **Загальний висновок**

Відмічені недоліки та зауваження, зроблені до окремих положень дисертації, не стосуються кваліфікаційних ознак роботи і не знижують її загального рівня.

У цілому дисертаційна робота Беляєва Григорія Борисовича «Вплив домішок сірки на утворення тріщин у зварних з'єднаннях жароміцних нікелевих сплавів», є завершеним науковим дослідженням, яке за обсягом виконаних досліджень, їх новизною та практичною значимістю одержаних результатів, їх рівнем повністю відповідає вимогам до робіт на здобуття

наукового ступеня технічних наук, зокрема пунктам 9, 11 та 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 року № 567.

Автор дисертаційної роботи – Белєв Григорій Борисович – заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.01. – Матеріалознавство.

Офіційний опонент,

доктор технічних наук, професор



  
Віталій ДМИТРИК  
ЗАКОННО:  
ПІДПИСАНО: \_\_\_\_\_  
МЕНІ СЕКРЕТАР  
КАБІНЕТА ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"  
Заковоротний О.Ю.  
28 04 20 21 р.