

ТЕПЛОВІ ПРОЦЕСИ І ЕВОЛЮЦІЯ СТРУКТУРИ НЕРЖАВІЮЧИХ СТАЛЕЙ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ТЕРТЯМ З ПЕРЕМІШУВАННЯМ ІНСТРУМЕНТОМ З рсBN

А.Л. Майстренко¹, М.П. Беженар¹, С.Д. Заболотний¹, В.А. Дутка¹, М.О. Черв'яков², А.М. Степанець¹,
І.О. Гнатенко¹, М.О. Цисар¹

¹ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України. 04074, м. Київ, вул. Автозаводська, 2. E-mail: otdel9m@ism.kiev.ua

²ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: cherviakov@paton.kiev.ua

Показано, що використання надтвердих матеріалів на основі кубічного нітриду бору для виготовлення робочих елементів інструмента для реалізації процесів зварювання сталей тертям з перемішуванням дає можливість забезпечити термомеханічну стійкість інструмента. Виконано комп'ютерне моделювання температурного поля в інструменті та у сталевих деталях в процесі зварювання сталей тертям з перемішуванням нержавіючих сталей інструментом на основі полікристалічного нітриду бору (рсBN). Показано узгодження чисельних і експериментальних результатів розподілу температури в зоні руху інструмента. Визначено міцність зварних з'єднань деталей з нержавіючих сталей та проаналізовано еволюцію структури зварних швів. Бібліогр. 17, табл. 4, рис. 8.

Ключові слова: еволюція структури, зварювання тертям з перемішуванням, інструмент, киборит, міцність, моделювання, нержавіючі сталі, температурне поле

Вступ. Як відомо, процес зварювання тертям з перемішуванням (ЗТП) здійснюється при температурах значно нижчих за температури плавлення зварюваних металів та сплавів, в результаті чого суттєво знижуються залишкові напруження й температурні деформації, еволюціонує мікроструктура зони з'єднання, що позитивно впливає на забезпечення міцності матеріалу деталей у зоні їх з'єднання. Спочатку цей метод успішно застосовувався для зварювання сплавів на основі магнію та алюмінію [1]. Магнієві сплави виявилися легко зварюваними матеріали методом ЗТП, оскільки процес зварювання здійснюється при невисоких температурах (200...260 °С) з використанням сталевих інструментів [1–3]. При зварюванні алюмінієвих сплавів тертям з перемішуванням характерні температури в зоні зварювання спостерігались в діапазоні 300...400 °С. Реалізація процесу ЗТП матеріалів на основі міді здійснюється вже при температурах 600...700 °С, що вимагає використання інструментів з твердих сплавів [4]. Але для зварювання сталей і жароміцних сплавів, в процесі зварювання яких спостерігається температура 600...1000 °С, необхідний інструмент вже із значно більшою термомеханічною стійкістю, зокрема, на основі спеціальних твердих сплавів або полікристалічних матеріалів на основі сBN [5, 6]. Для обґрунтування оптимальних конструкцій інструмента, раціональних режимів зварювання й одержання якісного з'єднання деталей в резуль-

таті ЗТП доцільно передусім виконувати математичне моделювання теплового стану інструмента й зварюваних деталей в процесі зварювання [5–7].

За останні 20 років спосіб ЗТП використовують для зварювання термостійких сплавів і сталей. Для реалізації процесу ЗТП нержавіючих сталей аустенітно-феритного типу і жароміцних сплавів необхідно застосовувати інструмент із термоміцних матеріалів, до яких відносяться спеціальні тверді сплави та полікристалічні матеріали на основі кубічного нітриду бору (рсBN) [8, 9].

В Інституті надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України ведуться роботи, спрямовані на розробку й застосування інструментів для ЗТП різних металів і сплавів [1–4, 7]. При цьому властивості матеріалів, які використовуються для виготовлення інструментів, повинні значно перевищувати механічні характеристики матеріалів, які зварюються або наплавляються. Крім того, інструмент, особливо його робоча частина (Pin), повинна зберігати високу зносостійкість і термостійкість при високих температурах. Ці матеріали мають зберігати свої властивості при значних температурах й циклічних напруженнях, які обумовлені зусиллями, діючими на інструмент при круговому згині в процесі зварювання або наплавлення.

Мета даної роботи полягає у створенні інструмента з полікристалічного нітриду бору (рсBN) для зварювання тертям з перемішуванням нержавіючих сталей і сплавів.

© А.Л. Майстренко, М.П. Беженар, С.Д. Заболотний, В.А. Дутка, М.О. Черв'яков, А.М. Степанець, І.О. Гнатенко, М.О. Цисар

віючих сталей, аналізі теплових процесів при зварюванні та оцінці механічних характеристик зварних з'єднань.

Матеріали та методики досліджень. Полікристалічні надтверді матеріали на основі cBN відомі на світовому ринку як інструментальні pcBN матеріали. Тенденції розвитку досліджень в області створення полікристалічних надтвердих матеріалів на основі КНБ можна ілюструвати на прикладі продукції ряду закордонних фірм, зокрема, фірм Element Six та MegaDiamond [10, 11]. У матеріалі цього класу Киборит [8, 9], в якому основна фаза cBN (близько 84%), що є визначальним фактором формування структури композиту з неперервним каркасом та високої твердості. Киборит усіх марок отримують реакційним спіканням cBN з Al в умовах високого тиску в твердосплавних апаратах високого тиску (АВТ) конструкції «ковадло з поглибленням» типу «тороїд» [8, 9]. Особливості властивостей композитів на основі pcBN полягають в тому, що вони мають високу твердість і тріщиностійкість, хімічну стійкість та механізм зношування переважно трибохімічний. У першому випадку в складі матеріалу більш 80% cBN, твердість забезпечує каркас cBN, висока тріщиностійкість – завдяки сполучному по границях зерен (табл. 1) [9]. Більш висока твердість у матеріалів із вмістом cBN у структурі більш 95%, прикладом такого матеріалу є розроблений в ІНМ НАН України матеріал «Киборит-1». Особливість структури – відсутність безперервного каркаса зв'язування (склад зв'язки AlN і AlB_{12} , кількість – 3% по масі, розташована у вигляді включень по границях зерен). Матеріал «Киборит-2» – pcBN одержують методом попереднього просочення алюмінієм стислого порошку cBN з наступним реакційним спіканням при високому тиску [8, 9]. Параметри спікання матеріалу «Киборит-2» – температура 1600...1750 К й тиск до 4,5 ГПа, при цьому слід зазначити додаткове виділення енергії хімічної реакції в робочому обсязі поряд з енергією зовнішнього нагрівання. Для такого процесу кращими є сталеві АВТ [12], одна з переваг яких – великий робочий обсяг, що дозволяє одержувати зразки великого розміру діаметром 32 мм і висотою 15 мм на пресах зусиллям 20 МН (табл. 1).

На рис. 1 представлені зміни відносної щільності (ρ), твердості (H_k) і тріщиностійкості (K_{Ic}) у полікристалічних матеріалах розглянутого типу для трьох груп (А, В, С) [9].

Нове застосування Киборита – робочий інструмент для зварювання тертям з перемішуванням. Обертіві інструменти цього типу складаються з бурту і виступаючого штиря (Pin) – рис. 2. При зварюванні штир заглиблюється у заготовку, а бурт притискається до поверхні. Тертя при обер-

Таблиця 1. Фізико-механічні властивості деяких марок Киборита [9]

Характеристики	Киборит-1	Киборит-2	Киборит-3
Кількість КНБ, %	96...97	84	70...75
Питома вага, г/см ³	3,40...3,45	3,35...3,38	3,60
Твердість по Кнупу при навантаженні 10 Н, ГПа	32...36	28...30	27
Тріщиностійкість K_{Ic} , МПа·м ^{1/2}	8...13,5	10,5	10,5
Міцність при стиску, ГПа	3,2	2,9	2,9
Міцність при розтягу, ГПа	0,37	-	-
Модуль пружності E , ГПа	880	-	-
Коефіцієнт Пуассона	0,16		
Теплопровідність λ , Вт/(м·К)	150	70	70
Термостійкість до температури, К	1400	1400	1400
Стійкість до окислення на повітрі до температури, К	1200	1200	1200
КТР, $\alpha \cdot 10^{-6} K^{-1}$	-	4,9...7,9	-
Діаметр пластини, мм	6,35...12,7	9,6... 31,8	9,6...31,8

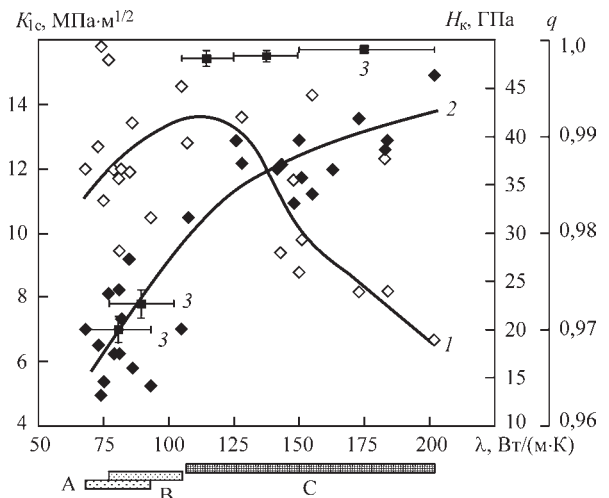


Рис. 1. Тріщиностійкість (1), твердість (2) і відносна щільність (3) полікристалів, отриманих реакційним спіканням порошку КНБ із 2 мас. % Al [9]

танні інструмента генерує теплоту, яка достатня для переходу матеріалів, що з'єднуються, до в'язко-пластичного стану.

Киборит-1 був отриманий шляхом реакційного спікання порошку кубічного нітриду бору (до 98%) з алюмінієм [8, 9]. Присутність у шихті інших добавок і високі параметри спікання призвели до одержання в складі зв'язки Киборита-1, поряд з AlN і AlB_{12} , також вищого бориду $\beta-AlB_{12}$. Комбінація високої твердості H_k (36...38 ГПа) і високої теплопровідності (100...150) Вт/м·К з достатнім рівнем тріщиностійкості (≥ 8 МПа·м^{1/2}) Киборита-1 забезпечило можливість його використання в лезових інструментах. В основу створення надтвердого полікристалічного матеріалу Ки-

борит-2 покладені принципи створення матеріалу з безперервною структурою каркаса КНБ та реакційне спікання з алюмінієм. Відмінність полягала в такому керуванні параметрами спікання, яке забезпечувало збільшення поверхні контакту «КНБ – інша фаза» при збереженні в структурі безперервного каркаса КНБ [9]. Наведені результати показують, що твердість реальних полікристалів, що містять від 65 до 96 % КНБ і зв'язці на основі AlN, у всіх випадках трохи нижча, ніж розрахована в припущенні адитивної залежності від фазового складу.

Таким чином, ми маємо можливість вибору з композитів ряду Киборит відповідного для використання в інструментах для зварювання сталей тертям з перемішуванням. Для виготовлення інструментів вибрали саме Киборит-2, керуючись його високою термостійкістю (1200 °С), а також тому, що цей матеріал має максимальну тріщиностійкість $K_{Ic} = 10,5 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$, що має важливе значення при циклічному круговому згині штиря, та розмірами діаметру й висоти заготовки 32×15 мм, які дали можливість виготовити інструменти з розміром штиря висотою 5...6 мм та діаметром бурта 25 мм (рис. 2, а).

Для досліджень були вибрані нержавіючі сталі типу AISI304 (аналог 08X18H10), 08X18H10T (аналог AISI 321), 03X20H16AG6, 02X18MBB та жароміцні сплави ЕП-718 (ХН45МВТЮБР) та ЭИ 698 (ХН73МБТЮ) [13], механічні властивості деяких з них наведено в табл. 2. Зовнішній вигляд

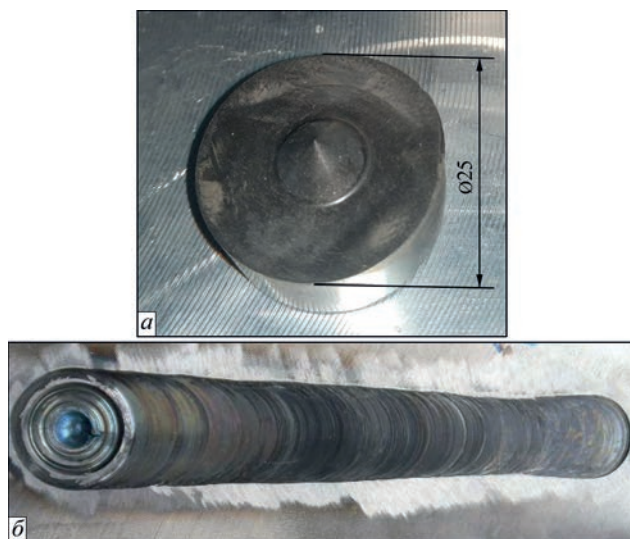


Рис. 2. Загальний вигляд інструмента із полікристалічного нітриду бору для зварювання нержавіючих сталей (а) та загальний вигляд зварного шва при зварюванні сталі AISI 304 (б)

зварного шва при зварюванні сталі AISI 304 наведено на рис. 2, б.

Вимірювання складових сили при зварюванні сталей. Дослідження зварювання сталей тертям з перемішуванням з вимірюванням складових сили, діючої на інструмент, виконувались на стенді, уставленому на столі вертикально-фрезерувального верстату 654, оснащеного вимірювальними давачами та програмним забезпеченням фірми НВМ (рис. 3). Режими зварювання: частота обертання інструмента 800 об⁻¹ та швидкість подачі 20...50 мм/хв. Інструмент встановлений під кутом 88° відносно поверхні деталі. Досліджувались зразки завтовшки 3...4 мм (табл. 3). Зварювання зразків досліджуваних сталей виконувалось на спеціальному стенді, оснащеному системою давачів, які вимірюють вертикальну та зсувну складові сили, прикладеної до виконуючого інструмента (рис. 3, табл. 3). Встановлено, що середні складові сили незалежно від частоти обертання і швидкості зварювання інструментом з конічною робочою частиною утримуються на одному рівні для всіх зразків досліджених сталей однакової товщини (табл. 2).

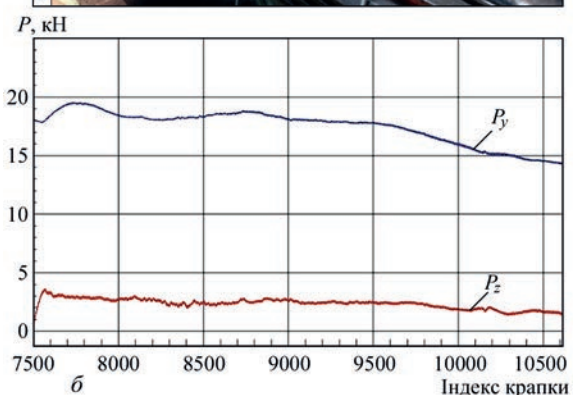


Рис. 3. Загальний вигляд стенда для дослідження процесу зварювання сталей тертям з перемішуванням (а), графік зміни складових сили, що діє на інструмент (б)

Таблиця 2. Механічні властивості досліджуваних матеріалів [13]

Сталь	E , ГПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ , %	$T_{лип}$, °С
08X18H10T (аналог AISI 321)	193	196	470	40	1400...1455
AISI 304 (аналог 08X18H10)	196	205	510	40	1400...1455
ЕП-718 (ХН45МВТЮБР) (згідно ТУ 14-1-3905-85)	205	550	1240	30	1260...1336
ЭИ 698 (ХН73МБТЮ)	200	705	1150	16	1370...1400

Таблиця 3. Результати вимірювань складових сил (ЗТП) зразків досліджуваних нержавіючих сталей

Матеріал зразків	Товщина зразка, мм	Горизонтальна складова P_x , Н		Вертикальна складова P_y , Н	
		середня	max	середня	max
03X20H16AG6	4	2385	3423	17597	19545
AISI 304 (аналог 08X18H10)	3	1226	2766	11992	15780

Вимірювання температури в зоні зварювання. Вимірювання температури в зоні зварювання виконувалось за допомогою інфрачервоного тепловізора Fluke-ir25 з дискретністю 5 с в різні моменти часу руху інструмента по зразку (рис. 4).

Моделювання температурного поля при ЗТП нержавіючих сталей. Проведено математичне моделювання температурного поля у зварюваних деталях у процесі ЗТП. Обрана тривимірна стаціонарна модель, яка базується на нелінійному рівнянні теплопровідності. Враховується перерозподіл теплових джерел на поверхнях контакту штиря інструмента з деталями, що зварюються. Враховується також теплообмін із зовнішнім повітряним середовищем на вільних поверхнях деталей.

Матеріал зварюваних деталей – нержавіюча сталь AISI 304. Дві пластини розміром 200×100×3 (4) мм зварювались методом ЗТП вздовж більшого розміру платин. Інструменти для зварювання виконані з матеріалу Киборит-2. У розрахунках враховано залежності теплофізичних властивостей сталі AISI 304 від температури: теплоємність C_p , коефіцієнт теплопровідності λ , густина ρ , межа плинності σ_T [14–16].

Математична модель температурного поля. Для опису температурного поля в зоні ЗТП розглядалась стаціонарна математична модель [17]

$$C_p \rho (\vec{u} \cdot \text{grad} T) = \text{div}(\lambda \text{grad} T), \quad (1)$$

де T – температура; C_p , ρ , λ – відповідно питома теплоємність, густина і коефіцієнт теплопровід-

ності; \vec{u} – вектор швидкості поступального руху деталей відносно інструмента.

На поверхнях інструмента та деталей (пластин), а також на поверхнях контакту інструмента і пластин задаються відповідні граничні умови. На поверхні контакту штиря, буртика і пластин діють теплові джерела тепла, зумовлені тертям і пластичним деформуванням матеріалу пластин у цій зоні контакту.

На поверхні контакту буртика діють теплові джерела, зумовлені тертям. Потужність цих джерел тепла обчислюється за формулою

$$q_s = \begin{cases} \frac{2\pi r n \mu F_n}{A_s}, & \text{при } T < T_{\text{пл}}, \\ 0, & \text{при } T \geq T_{\text{пл}}, \end{cases} \quad (2)$$

де r – віддаль від точки цієї поверхні контакту до осі обертання буртика зі штирем (піном); n – кількість обертів буртика за хвилину; μ – коефіцієнт тертя; F_n – осьове зусилля, що діє на штир з буртиком; A_s – площа поверхні контакту буртика з деталями; $T_{\text{пл}}$ – температура плавлення матеріалу пластин.

На рис. 5 представлені результати розрахунків розподілів температури в складових конструкції інструмента та зварювальної пластини з нержавіючої сталі AISI 304. На рис. 6 наведено порівняння експериментальних та розрахункових температур. Наведені максимальні значення експериментально виміряних температур на жаль обмежені характе-

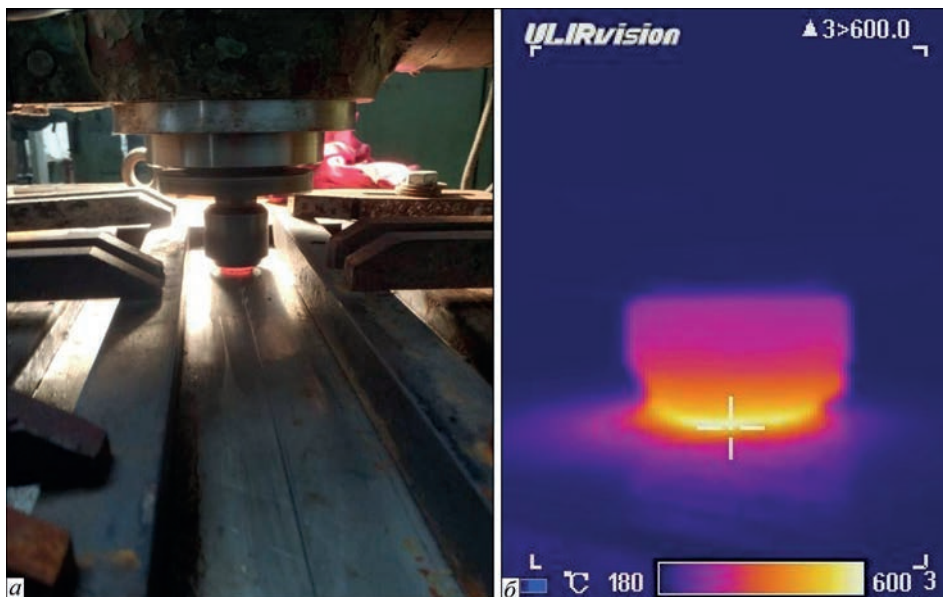


Рис. 4. Зображення процесу ЗТП пластин зі сталі AISI 304 завтовшки 3 мм (а), вимірювання розподілу температури при ЗТП нержавіючої сталі (поза межами буртика інструмента) (б)

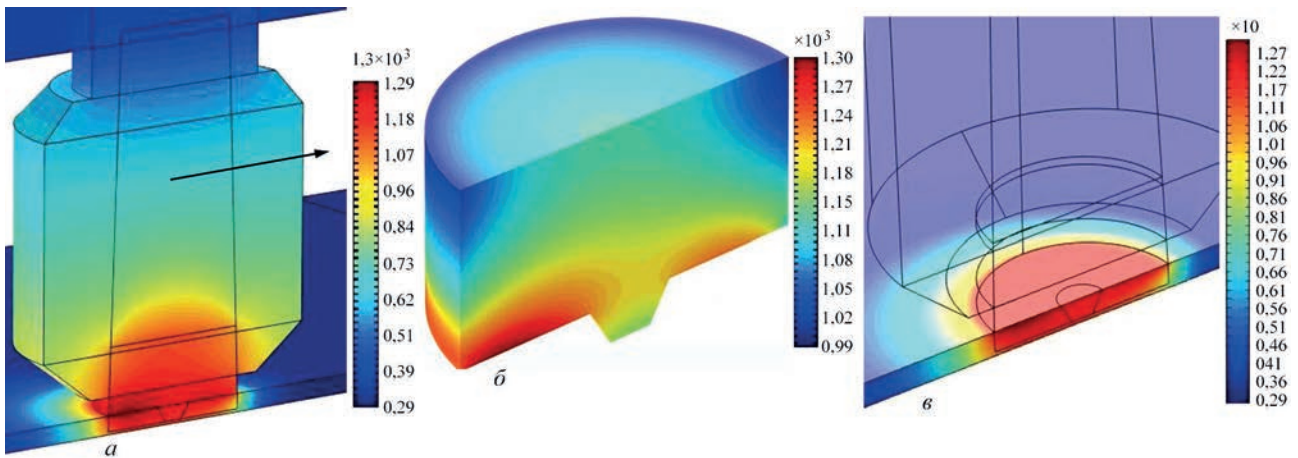


Рис. 5. Картини температурного поля, обчисленого в різних частинах розрахункової області (максимальна температура – 1303 К): а – в пластині, інструменті і оснащенні інструмента (стрілкою вказано напрям поступального руху інструмента); б – в інструменті; в – у зварювальній пластині

ристиками приладу та складністю доступу приладу до зони зварювання, але це означає, що це не максимальні діючі температури в зоні зварювання, а тільки максимальні температури на вимірному (обмеженому) відрізку.

Результати досліджень та обговорення. Проведено експериментальне визначення розподілу температури в зоні зварювання досліджуваних сталей. Результати розподілів температури виміряних в зонах зварювання досліджених сталей поза буртиком інструмента наведено на рис. 7.

Максимальна виміряна температура зварювання зразків сталей змінювалась від 500 до 800 °С (рис. 7), причому температура зварювання зразків завтовшки 4 мм практично у 1,5 рази більша за температуру у зразках завтовшки 3 мм, що обумовлено більшою роботою пластичних деформацій в зоні зварювання. Також звернемо увагу на

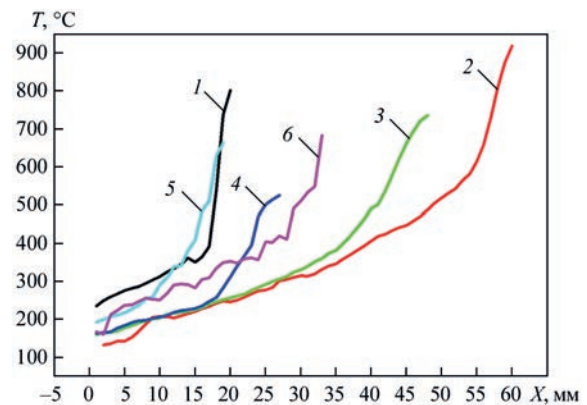


Рис. 7. Експериментально визначені розподіли температури позаду буртика інструмента в процесі ЗТП: товщина пластини сталі 08X18N10T (1) – 4 мм; сталі 02X18MBB (2) – 4 мм; сталі 03X20N16AG6 (3) – 4 мм; сталі AISI 304 (4) – 3 мм; EP-718 (5) – 4,3 мм; сталі ХН73МБТЮ (6) – 4,3 мм; координата X – масштабна лінійка зварюваного зразка сталі

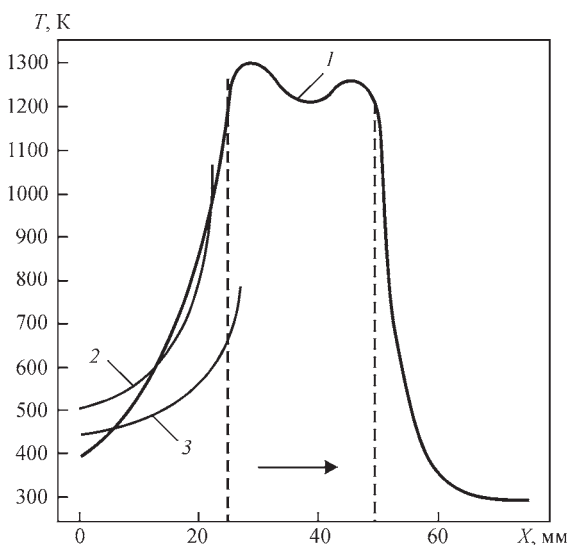


Рис. 6. Порівняння розрахункових (1) і експериментальних (2, 3) температур уздовж лінії зварювання пластин сталі, що зварюються. Координата X, мм – масштабна лінійка зварюваного зразку сталі. Стрілкою показано напрямок руху інструмента. Пунктирні лінії – межі бурту інструмента (2 – сталь X18N10T – 4 мм; 3 – сталь AISI 304 – 3 мм)

те, що середня температура при зварюванні досліджених сталей дорівнює $T_{\text{сеп}} = 712$ °С, тобто середня температура зварювання сталей аустенітно-феритного класу відповідає рівнянню $T_{\text{зв}} = (0,45 \dots 0,62) T_{\text{пл}}$, на відміну від відомого діапазону температур зварювання магнієвих та алюмінієвих сплавів, який відповідав співвідношенню $T_{\text{зв}} = (0,4 - 0,5) T_{\text{пл}}$.

Металографічні дослідження зварних зразків виконувались на полірованих шліфах, протравлених розчином HCl+HNO₃ протягом 5 хв. Зображення мікроструктури, що отримані на оптичному мікроскопі XUM-102, при збільшенні $\times 500$ наведено на рис. 8. Розміри окремих зерен визначалися з використанням програми LevenhukLite та наведені безпосередньо на зображеннях.

При зварюванні сталі 08X18N10T розмір зерен практично не змінюється, оскільки розмір окремих зерен в зоні зварювання знаходиться в межах 10...20 мкм, а у вихідному металі 5...15 мкм. Розміри зерен в зоні зварювання сталі 02X18MBB 10...50 мкм, а в матеріалі, що зварюється –

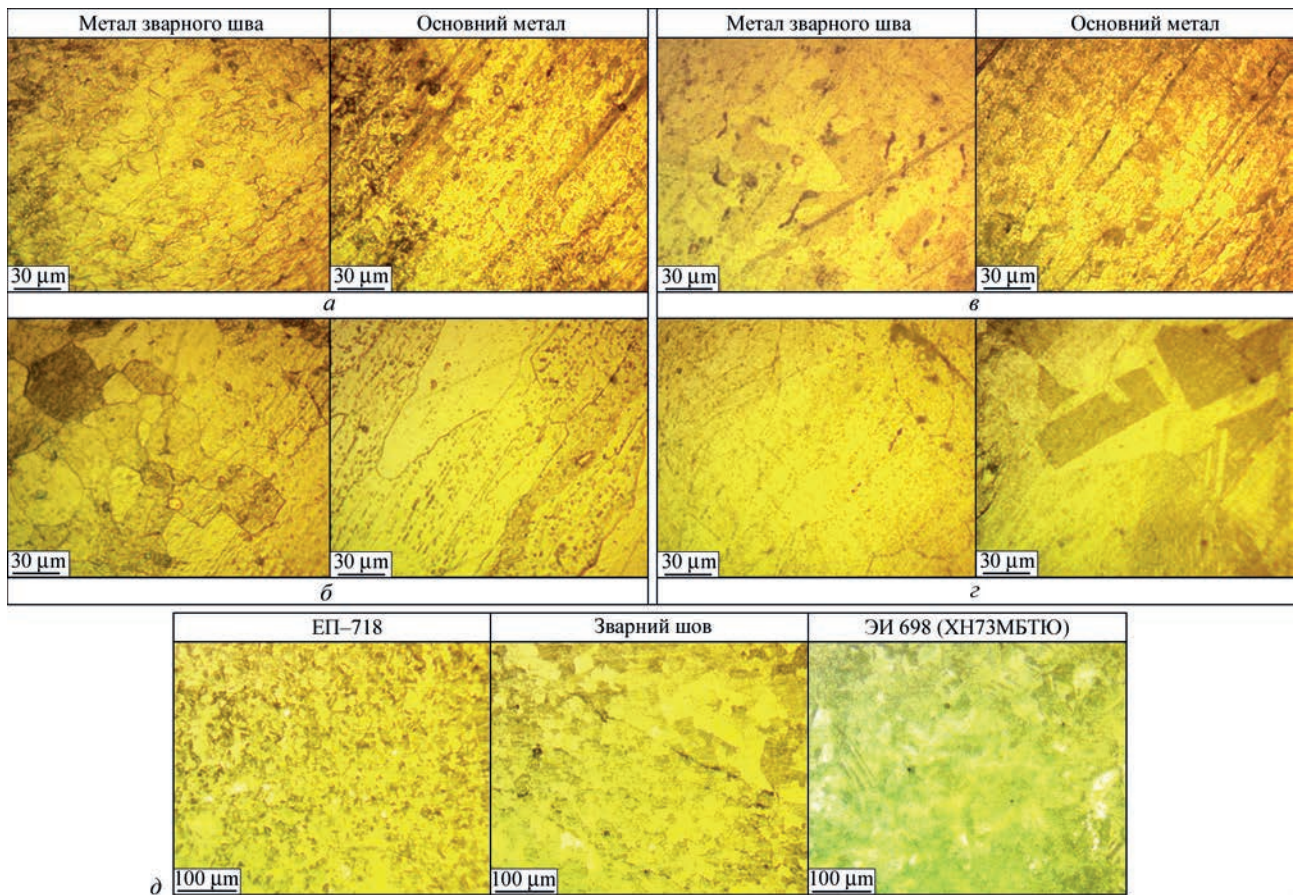


Рис. 8. Еволюція структури зварних швів у досліджених сталях ($\times 500$): 08X18H10T (а); 02X18MBB (б); 03X20H16AG6 (в); AISI 304 – аналог сталі 08X18H10 (г) EP 718 + ЭИ 698 (д)

50...150 мкм, тобто розмір зерна у зварному шві зменшується відносно вихідного металу від 3 до 5 разів. В зоні зварювання сталі 03X20H16AG6 спостерігається зростання окремих зерен. Так, якщо в основному металі маємо зернистість 2...10 мкм, то в зоні зварного шва зернистість зростає до 10...50 мкм. Зернистість металу зварного шва сталі AISI 304 (аналог сталі 08X18H10) досягає 20...60 мкм, а в основному металі розмір зерна досягає 40...100 мкм, тобто при зварюванні сталі AISI 304 в зоні зварного з'єднання відбувається зменшення розміру зерен від 1,6 до 2,0 разів.

З аналізу результатів металографії зміни розмірів зерен у комбінованому зварному шві відношення розмірів зерен у зварному шві сплаву EP-718 до розмірів зерен в основному металі зменшується практично в 2 рази, а розміри зерен

у зварному шві сталі ЭИ 698 зменшується відносно розмірів зерен в основному металі у 3 рази.

Міцність з'єднань досліджених сталей зварених тертям з перемішуванням. Випробовування зварних зразків матеріалів на розтяг виконували на сервогідравлічній машині MTS-318.25. Всі зразки досліджуваних металів для визначення міцності вирізались в одному напрямку – ортогонально вісі зварювання пластин. Визначено міцність зварних з'єднань досліджених сталей по відношенню до міцності основного металу цих сталей. Слід відзначити, що відношення міцності зварного з'єднання до основного металу змінювалось від 0,51 до 0,68 (табл. 4), тобто зниження міцності достатньо суттєве, що визначає необхідність оптимізувати кінематичні та силові параметри процесу ЗТП, які забезпечать більшу міцність зварних з'єднань. Тому оптимізація кінематичних та силових параметрів процесу зварювання, які мають забезпечити високу міцність зварного з'єднання, вимагає тривалого й кропіткого дослідження, яке є наступною задачею розвитку цього технологічного напрямку.

Висновки

1. Створено інструмент із полікристалічного нітриду бору (pcBN) для ЗТП нержавіючих сталей та жароміцних нікелевих сплавів. Виготов-

Матеріал	Тип зразка	σ_t , МПа	σ_R , МПа	σ_R/σ_t
08X18H10T	Основний метал	194	474	
	Зварне з'єднання	135	280	0,59
02X18MBB	Основний метал	429	707	
	Зварне з'єднання	183	385	0,54
03X20H16AG6	Основний метал	403	758	
	Зварне з'єднання	275	390	0,51
AISI 304	Основний метал	202	511	
	Зварне з'єднання	171	349	0,68

лено дослідні інструменти з pcBN Киборит-2 для здійснення процесу ЗТП елементів конструкцій з нержавіючих сталей та жароміцних сплавів завтовшки до 4 мм.

2. Запропоновано модель теплового процесу зварювання нержавіючої сталі тертям з перемішуванням та розраховано розподіли температури в інструменті та зварюваних деталях.

Дослідження теплових процесів при зварюванні показали, що максимальна температура в зоні зварювання досліджених сталей, в залежності від товщини зварюваних зразків, змінювалась від 500 до 900 °C, що складає орієнтовно $(0,45 \dots 0,62) T_{пл}$.

3. Виконано металографічне дослідження середнього розміру зерна зварного шва у порівнянні з основним металом зразку. Так, середній розмір зерен в зоні зварювання сталі 08X18H10T знаходиться в межах 10...20 мкм, а у вихідному металі 5...15 мкм, тобто залишається без суттєвих змін. Середні розміри зерен в зоні зварювання сталі 02X18MBB досягають 10...50 мкм, а в матеріалі зварного шва 50...150 мкм, тобто розмір зерна у зварному шві зменшується відносно основного металу від 3 до 5 разів. В зоні зварного шва сталі 03X20H16AG6 спостерігається незначний ріст розмірів до 10...50 мкм відносно основного металу з розмірами зерен 2...10 мкм. Розмір зерен у зварному шві сталі AISI 304 досягає 20...60 мкм відносно основного металу з розмірами зерен 40...100 мкм. Тобто при зварюванні в зоні зварного з'єднання відбувається зменшення розміру зерен від 1,6 до 2,0 разів. Середній розмір зерен у зварному шві змішаного з'єднання сплавів ЕП-718 та ЭИ-698, по відношенню до розміру зерен в основному металі цих сплавів, зменшуються від 2 до 3 разів.

4. Співвідношення міцності зварних з'єднань досліджених матеріалів по відношенню до міцності основного металу змінювалось від 0,51 до 0,68, що визначає необхідність провести більш глибокі дослідження, спрямовані на оптимізацію кінематичних й силових параметрів процесу ЗТП, які забезпечать більшу міцність зварних з'єднань цього типу.

Список літератури

1. Майстренко А.Л., Лукаш В.А., Заболотный С.Д. и др. (2016) Применение метода трения с перемешиванием для сварки магниевых сплавов и модификации их структуры. *Автоматическая сварка*, **5**, 74–81.
2. Майстренко А.Л., Лукаш В.А., Усенко Б.О. и др. (2019) Сварка алюминиевых криволинейных панелей методом трения с перемешиванием. *Тези Всеукраїнської міжнародної конференції «Проблеми зварювання та споріднених технологій», 17–19 вересня 2019 р., Миколаїв–Коблево*, 85–86.
3. Гнатенко І.О., Олійник Н.О., Ільницька Г.Д. та ін. (2019) Вплив зварювання тертям з перемішуванням на корозійну стійкість високоміцних алюмінієвих сплавів. Породо-рущуючий і металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: *Сб. науч. тр. 2019. Вып. 22. Киев, ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины*, сс. 469–476.

4. Григоренко Г.М., Адеева Л.И., Туник А.Ю. и др. (2015) Использование метода сварки трением с перемешиванием для ремонта и восстановления изношенных медных плит кристаллизаторов МНЛЗ. *Автоматическая сварка*, **5-6**, 60–63.
5. Zhu, X.K., Chao, Y.J. (2004) Numerical simulation of transient temperature and residual stresses in friction stir welding of 304L stainless steel, *Journal of Materials Processing Technology*, **146**, 263–272.
6. Al-moussawi, M., Smith, A., Young, A. et al. (2016) An Advanced Numerical Model of Friction Stir Welding of DH36 Steel, *11th International Symposium of friction stir welding. Cambridge, UK. Conference Paper*. Режим доступу: <https://www.researchgate.net/publication/305330065>
7. Майстренко А. Л., Нестеренков В. М., Дутка В. А. и др. (2015) Моделирование тепловых процессов при сварке и модификации структуры металлов и сплавов трением с перемешиванием. *Автоматическая сварка*, **1**, 5–14.
8. Новіков М.В., Шульженко О.О., Беженар М.П. та ін. (1998) *Спосіб спікання композиційного матеріалу на основі кубічного нітриду бору*. Пат. 25281А, Україна, МКІ С04В35/5831. Заявл. 21.07.97, Опубл. 25.12.98, бюл. № 6.
9. Новіков Н.В., Шульженко А.А., Беженар Н.П. и др. (2001) Киборит: получение, структура, свойства, применение. *Сверхтвердые материалы*, **2**, 40–51.
10. *Megadiamond pcBN Products for Industrial Tooling*. USA: The Publication of Megadiamond.
11. *Introduction to De Beers PCD and pcBN cutting tool materials: 1.2.3.* – The Publication of De Beers Industrial Diamond Division.
12. Беженар Н.П., Романенко Я.М., Коновал С.М. и др. (2018) Киборит: новые материалы и новые области применения. *VI-я Международная самсоновская конференция «Материаловедение тугоплавких соединений»*, 22–24 мая, г. Киев, Украина.
13. Зубченко А.С. (2003) *Марочник сталей и сплавов*. Москва, Машиностроение.
14. Bentz, D.P., Prasad, K. (2007) *Thermal Performance of Fire Resistive Materials I. Characterization with Respect to Thermal Performance Models*, Edition: NISTIR 7401; Publisher: U.S. Department of Commerce.
15. Bentz, D.P., Flynn, D.R., Kim, J.H., Zarr, R.R. (2006) A Slug Calorimeter for Evaluating the thermal Performance of Fire Resistor Materials. *Fire and Materials*, **30** (4), 257–270.
16. Bogaard, R.H., Desai, P.D., Li, H.H., Ho, C.Y. (1993) Thermophysical Properties of Stainless Steels. *Thermochimica Acta*, **218**, 373–393.
17. Nandan, R., Roy, G.G., Lienert, T.J., DebRoy, T. (2006) Numerical modelling of 3D plastic flow and heat transfer during friction stir welding of stainless steel. *Science and Technology of Welding and Joining*, **11**, 5, 526–53.

References

1. Majstrenko, A.L., Lukash, V.A., Zabolotny, S.D. et al. (2016) Application of friction stir method for welding of magnesium alloys and their structure modifying. *The Paton Welding J.*, **5-6**, 68-74.
2. Maistrenko, A.L., Lukash, V.A., Usenko, B.O. et al. (2019) Welding of aluminium curvilinear panels by friction stir welding method. In: *Abstr. of Papers of All-Ukrainian Int. Conf. on Problems of Welding and Related Technologies* (17-19 September, 2019, Mykolaiv-Kobleva), 85–86.
3. Gnatenko, I.O., Oliiynyk, N.O., Ilynytska, G.G. et al. (2019) Influence of friction stir welding on corrosion resistance of high-strength aluminium alloys. Rock destruction and metal-working tool: Technique and technology of its fabrication and application. Issue 22. Kyiv, ISM, 469–476 [in Russian].
4. Grigorenko, G.M., Adeeva, L.I., Tunik, A.Yu. et al. (2015) Application of friction stir welding method for repair and restoration of worn-out copper plates of MCCB moulds. *The Paton Welding J.*, **5-6**, 55-58.
5. Zhu, X.K., Chao, Y.J. (2004) Numerical simulation of transient temperature and residual stresses in friction stir welding of 304L stainless steel. *J. of Materials Proc. Technology*, **146**, 263–272.

6. Al-moussawi, M., Smith, A., Young, A. et al. (2016) An Advanced Numerical Model of Friction Stir Welding of DH36 Steel. In: *Proc. of 11th Inter. Symp. of Friction Stir Welding. Cambridge, UK*. <https://www.researchgate.net/publication/305330065>
7. Majstrenko, A.L., Nesterenkov, V.M., Dutka, V.A. et al. (2015) Modeling of heat processes for improvement of structure of metals and alloys by friction stir welding method. *The Paton Welding J.*, **1**, 2-10.
8. Novikov, M.V., Shulzhenko, O.O., Bezhenar, M.P. et al. (1998) *Method of sintering of composite material based on cubic boron nitride*. Pat. 25281A, Ukraine, Int. Cl. C04B35/5831. Fil. 21.07.97, Publ. 25.12.98 [in Ukrainian].
9. Novikov, M.V., Shulzhenko, O.O., Bezhenar, M.P. et al. (2001) Kiborit: manufacture, structure, properties, application. *Sverkhvorydye Materialy*, **2**, 40–51 [in Russian].
10. *Megadiamond pcBN Products for Industrial Tooling*. USA: The Publication of Megadiamond.
11. *Introduction to De Beers PCD and pcBN cutting tool materials: 1.2.3.* – The Publication of De Beers Industrial Diamond Division.
12. Bezhenar, N.P., Romanenko, Ya.M., Konoval, S.M. et al. (2018) Kiborit: New materials and new fields of application. In: *Proc. of 6th Int. Samsonov Conf. on Materials Science of Refractory Compounds* (Kyiv, Ukraine, 22-24 May 2018).
13. Zubchenko, A.S. (2003) Grades of steels and alloys. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
14. Bentz, D.P., Prasad, K. (2007) *Thermal Performance of Fire Resistive Materials I. Characterization with Respect to Thermal Performance Models*, Edition: NISTIR 7401; Publisher: U.S. Department of Commerce.
15. Bentz, D.P., Flynn, D.R., Kim, J.H., Zarr, R.R. (2006) A slug calorimeter for evaluating the thermal performance of fire resistive materials. *Fire and Materials*, **30** (4), 257–270.
16. Bogaard, R.H., Desai, P.D., Li, H.H., Ho, C.Y. (1993) Thermophysical properties of stainless steels. *Thermochemica Acta*, **218**, 373–393.
17. Nandan, R., Roy, G.G., Lienert, T.J., DebRoy, T. (2006) Numerical modelling of 3D plastic flow and heat transfer during friction stir welding of stainless steel. *Sci. and Technol. of Welding and Joining*, **11**(5), 526–53.

THERMAL PROCESSES AND EVOLUTION OF STAINLESS STEEL STRUCTURE IN FRICTION STIR WELDING WITH A TOOL FROM pcBN

A.L. Maistrenko¹, M.P. Bezhenar¹, S.D. Zabolotnyi¹, V.A. Dutka¹, M.O. Cherviyakov², A.M. Stepanets¹, I.O. Gnatenko¹, M.O. Tsysar¹

¹V. Bakul Institute for Superhard Materials of the NAS of Ukraine, 2 Avtozavodska Str., 04074, Kyiv. E-mail: otel9m@ism.kiev.ua

²E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: cherviyakov@paton.kiev.ua

It is shown that application of superhard materials based on cubic boron nitride for manufacture of working components of the tool for realization of friction stir welding processes allows ensuring the tool thermomechanical resistance. Computer modeling of the temperature field in the tool, and in steel parts during friction stir welding of stainless steels with a tool based on polycrystalline boron nitride (pcBN) was performed. Agreement between the numerical and experimental results of temperature distribution in the tool movement zone is shown. Strength of welded joints of stainless steel parts was determined, and evolution of weld structure was analysed. 17 Fig., 4 Tabl., 8 Fig.

Keywords: structure evolution, friction stir welding, tool, kiborit, strength, modeling, stainless steels, temperature field

Надійшла до редакції 28.06.2023



«SCHWEISSEN & SCHNEIDEN» – 2023

Каталог учасників виставки
Catalogue/Messekatalog. DVS Media GmbH, Duesseldorf, 2023, 672 p.

З каталогом учасників виставки «SCHWEISSEN & SCHNEIDEN» (11 – 15 вересня 2023 р., Ессен, Німеччина) можна ознайомитись в редакції журналу «Автоматичне зварювання». Редакція виконує пошук фірм та компаній з каталогу з тематики Замовника.

