

## ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ ТЕРТЯМ З ПЕРЕМІШУВАННЯМ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ

В роботі наведені експериментальні дані стосовно впливу режиму зварювання тертям з перемішуванням алюмінієвого сплаву на характер розподілу твердості по перетину зварного шву.

*Ключові слова:* сталь, розтягання, напруження, деформація, падіння напруження, деформаційне старіння, реверсивна деформація

На основі аналізу експериментальних даних [1-3], які стосуються технології зварювання тертям, окрім особливостей конструктивного характеру, одним з основних параметрів являється температура розігріву з'єднувальних елементів. Враховуючи, що температура в зоні зварювання не повинна перебільшувати значення початку переходу в рідкий стан можна вважати, що якість зварного з'єднання в значній мірі буде залежати від процесу структурних змін в металі. Обумовлено наведене положення залежністю дифузійного масопереносу металу при пластичній деформації по з'єднувальним поверхням, при формуванні зварного шву. На підставі цього, процес формування зварного з'єднання за умов відсутності розплавлення в значній мірі буде визначатися спроможністю металу до пластичної течії. В свою чергу рівень пластичних властивостей залежить від співвідношення між температурою і швидкістю деформації [4].

Метою роботи являється аналіз процесів, що визначають формування зварного з'єднання за технологією тертям з перемішуванням.

Матеріалом для дослідження був сплав на основі алюмінію марки АМг 5 з хімічним складом: 4,8 % Mg, 0,5 % Mn, 0,36 % Fe, у вигляді пластин товщиною 2 мм. З урахуванням експериментальних даних [3, 5] та технічних рішень [3] стосовно геометричних розмірів робочого елемента, для зварювання тертям з перемішуванням (ЗТП) був виготовлений робочий інструмент, форма і розміри якого представлені на рис.1. Аналіз процесів структурних змін в металі поблизу з'єднувальних кромки проводили за допомогою рентгеноструктурних досліджень на дифрактометрі типу ДРОН-1УМ з ви-

значенням густини дефектів кристалічної будови і викривлень другого роду. Твердість вимірювали за методом Брінелля з використанням приладу типу ТДМ-1.

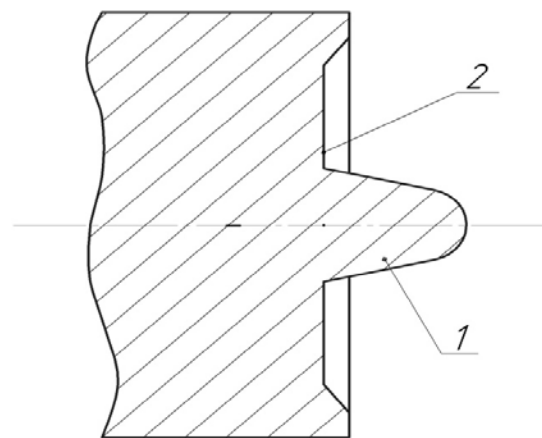


Рис. 1. Схематичне зображення робочого інструмента для зварювання тертям із перемішуванням: 1 – штифт; 2 – поверхня плеча

В процесі занурювання обертаючогося штифта робочого інструмента (рис. 1) в метал, за рахунок виділення теплової енергії від напружень тертя, кромки дуже швидко розігріваються до температур що забезпечують високі показники пластичності. Разом з цим, спрямований масоперенос металу при ротаційних ефектах від штифта супроводжується обов'язковим відхиленням зони зварювального шву від симетричного вигляду (рис. 2).

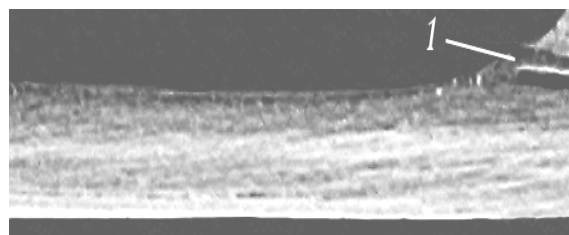


Рис. 2. Макроструктура перетину зварного шву: 1 – зона виносу металу

Як показали дослідження, формування зварного шву у випадку недостатньої температури розігріву алюмінієвого сплаву, супроводжується зростанням адгезії металу по поверхні тертя з штифтом, що неодмінно приведе до зниження якості з'єднання в цілому. Так, за умов частоти обертання робочого інструмента  $600 \text{ хв}^{-1}$  при швидкості переміщення уздовж з'єднувальних кромок ( $V$ )  $0,4 \text{ мм/с}$ , поверхня шву після розгону металу має дуже високу шорсткість (максимальні немонотонності металу по поверхні склали значення до  $0,2-0,3 \text{ мм}$ ) (рис. 3, а). На підставі цього, з урахуванням впливу якості підготовки поверхні на розвиток процесів втоми при циклічному навантаженні [6], підвищена шорсткість поверхні зварного шву, сформованого по визначеній технології, вже буде обумовлювати підвищення вірогідності зародження осередків руйнування металу.

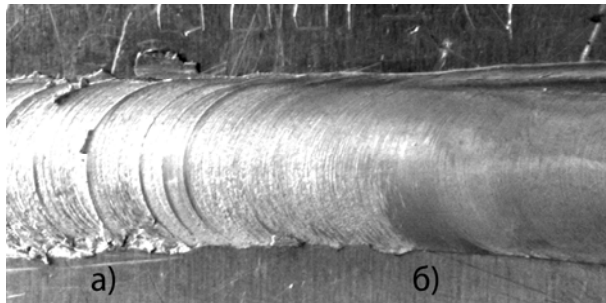


Рис. 3. Вигляд поверхні зварного з'єднання зі сторони поверхні переміщення робочого інструмента: а – ділянка з підвищеною шорсткістю зони термічного впливу; б – ділянка шву з високою якістю

Окрім підвищення шорсткості поверхні, за наведеним режимом зварювання, в області кореня зварного шву спостерігається формування дефекту у вигляді повздовжньої тріщини (рис. 4). Таким чином, недостатня температура розігріву кромок з'єднувальних елементів не дає змоги досягти умов необхідного рівня швидкості перемішування металу. Експериментально спостережувані нещільності металу уздовж з'єднувальних поверхонь є додатковим свідченням стосовно впливу температурно-деформаційних параметрів роботи інструмента на якість зварного з'єднання [2, 5].

Підвищення пластичних властивостей алюмінієвого сплаву за рахунок одночасної дії підвищення швидкості переміщення робочого інструмента уздовж шву до величини  $0,7 \text{ мм/с}$  та частоти обертання до  $1000 \text{ хв}^{-1}$  привело до формування достатньо якісної поверхні в зоні розгону металу, над зварним швом (рис. 3, б). Можна вважати, що співвідношення між процесами

ковзання та зчеплення металу з поверхнею інструмента зміщується в сторону підвищення частки ковзання. Наведене положення достатньо якісно підтверджується відсутністю формування повздовжньої тріщини та об'ємів металу з локальною нещільністю в області кореня зварного шву. В порівнянні з низьким ступенем розігріву (рис. 3, а), зростання температури супроводжується якісними змінами характеру формування зварного шву. Так, за умов підвищеного зчеплення металу з штифтом та плечем інструмента, формується підвищена концентрація порожнин, що призведе до зниження щільності металу в області максимального масопереносу. В наслідок цього, підвищений тиск що виникає поблизу контактуючих поверхонь (метал-інструмент) компенсується низькою щільністю металу і витискання його з робочої зони інструмента практично не спостерігається. Інша річ, коли частка процесів масопереносу, що обумовлена ковзанням, зростає, а зчеплення зменшується. В наслідок цього щільність металу в зоні тертя зростає, що супроводжується очікуваним позитивним впливом на якість зварного з'єднання. Підтверджується наведене положення практично повною відсутністю низки порожнин та ділянок незварювання (вигляд, подібний повздовжній тріщині) в області кореня зварного шву. Додатковим доказом являється спостережуваний частковий винос матеріалу сплаву у вигляді викривленої фольги (рис. 5). Винос матеріалу із області термічного впливу обумовлений по-перше підвищенням пластичності сплаву від його розігріву до більш високих температур та зростанням питомого напруження. Враховуючи збільшення об'єму металу (пропорційно коефіцієнту термічного розширення) після розігріву до більш високих температур при незмінному напруженні притискування робочого інструмента до з'єднувальних кромок, зайва частка сплаву повинна бути видавлена.

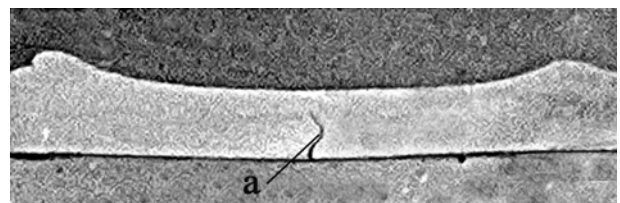


Рис. 4. Макроструктура перетину зварного шву з дефектом, який подібний повздовжній тріщині (а)

Враховуючи, що в процесі пластичного деформування при підвищених температурах підтримується визначене співвідношення між процесами накопичення і анігіляції дефектів кри-

талічної будови, представляє визначений інтерес оцінити частку пластичності, яка може бути зв'язана з дислокаційним механізмом.

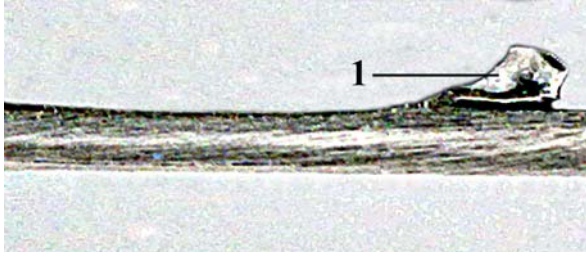


Рис. 5. Перетин зварного шву: 1 – частковий винос матеріалу сплаву у вигляді фольги

Так, в першому наближенні співвідношення напруження при деформуванні металевих матеріалів може бути оцінено у вигляді:

$$\sigma = A \cdot G \cdot b \sqrt{\rho}, \quad (1)$$

де  $\sigma$  – напруження;  $A$  – розмірний фактор;  $G$  – модуль зсуву;  $b$  – вектор Бюргерса;  $\rho$  – густина дислокацій.

За співвідношенням (1) пом'якшення деформованого матеріалу досягається за рахунок зменшення густини дислокацій. Наведена мета може бути досягнута двома шляхами. Перший напрямок – це міграція великокутових границь. При цьому процесі, який називають рекристалізацією [6], зайві дислокації при виході на границі зерен анігілюють, що підтверджується відомими експериментальними даними [7]. Другий процес супроводжується перебудовою дислокаційної структури – це повернення та полігонізація [6].

У загальному вигляді енергія активації дифузійних процесів, що визначають міграцію границь зерен при рекристалізації залежать від енергії активації процесів формування та міграції вакансій у визначеному мікрооб'ємі металу. На підставі цього, у випадку коли концентрація вакансій перебільшує термічно рівноважне значення, енергія активації розвитку рекристалізації знижується [8].

Аналіз експериментальних даних по деформації металевих матеріалів з різним типом кристалічної решітки, при різних температурах і швидкості деформації показує існування співвідношення між процесами деформаційного зміцнення та динамічного пом'якшення. Так, із аналізу характеру зміни мікротвердості після зварювання алюмінієвого сплаву можна, за якісними ознаками, визначити, які процеси мають перевагу за умов конкретних параметрів зварювання. При швидкості обертання  $600 \text{ хв}^{-1}$ , коли формується поверхня високої шорсткості

в зоні термічного впливу і області шву, спостерігається екстремальний характер зміни НВ з максимумом по з'єднувальним кромкам (рис. 6). Після підвищення швидкості обертання робочого інструменту до  $1000 \text{ хв}^{-1}$ , а також збільшення величини подачі, можна вважати досягнутими стабільні умови процесу зварювання. Поверхня зони термічного впливу формується достатньо якісною, з низькою шорсткістю (рис. 3, б). Характер зміни НВ має протилежний вигляд: екстремальна залежність, але з мінімумом мікротвердості в зоні зварного шву (рис. 7). Значне зниження мікротвердості в зоні термічного впливу вказує на досягнення умов, за яких розвиток процесів динамічного пом'якшення суттєво перебільшує вплив деформаційного зміцнення на розвиток структурних змін в алюмінієвому сплаві. За цих умов можна було б вважати, що при пластичній деформації в процесі зварювання з перемішуванням дислокаційний механізм не реалізується [2].

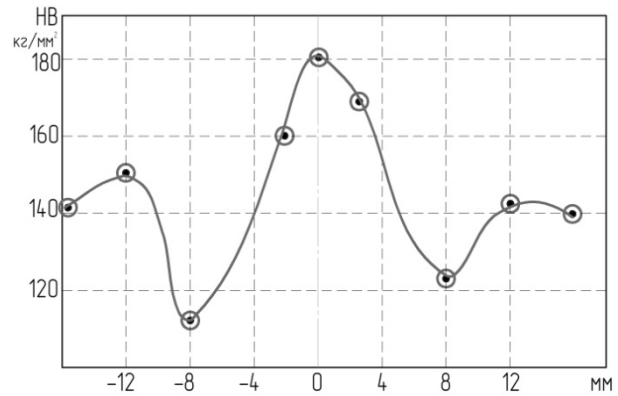


Рис. 6. Зміна твердості за Брінеллем по перетину зварного шву в залежності від режиму зварювання

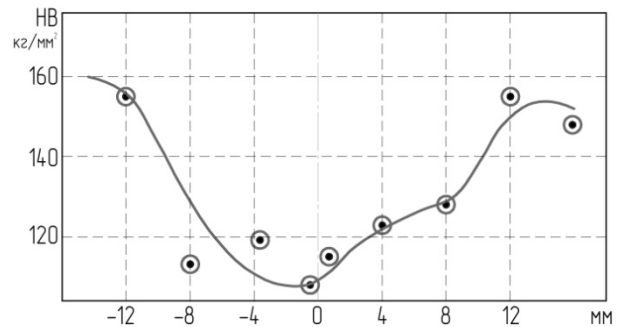


Рис. 7. Зміна твердості за Брінеллем по перетину зварного шву в залежності від режиму зварювання

Використання рентгеноструктурного аналізу для визначення густини дислокацій і викривлень другого роду показано, що в металі фольги, яка видавлена, густина дислокацій перебільшує аналогічну величину основного металу приблизно в 2 рази, по викривленням другого роду на 50 %. Отримані результати можна роз-

глядати як свідчення впливу деформаційного зміцнення на процеси структурних перетворень при пластичній деформації за умов зварювання з перемішуванням.

#### БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Gould, J. E. Heat Flow Model for friction stir welding of aluminum alloys [Текст] / J. E. Gould, Z. Feng // Mater. Process. Manuf. Sci. – 1998. – v. 7. – С. 185-194.
2. Reynolds, A. P. Microstructure development in aluminum alloy friction stir welds [Текст] / A. P. Shneider // Friction stir welding and processing. – 2007. – С. 51-70.
3. Patent 5,460,317. United States. Friction welding [Текст] / Thomas, W. M. Nicholas E. D., Needham, J. C. at al.; assignee The Welding Institute Cambridge, United Kingdom; public date: 10.06.1993; public № WO93/10935.
4. Вакуленко, И. А. О параметрах пластического течения реверсивно деформируемой при повышенной температуре углеродистой стали [Текст] / И. А. Вакуленко, В. П. Колпак, С. Ю. Таран-Жовнир // Черная металлургия. – 1992. – № 4. – С. 39–41.
5. Shneider, J. A. Temperature distribution and resulting metal flow [Текст] / J. A. Shneider // Friction stir welding and processing. – 2007. – С. 37–49.
6. Вакуленко, І. О. Дефекти залізничних коліс [Текст] : монографія / І. О. Вакуленко, В. Г. Анофрієв, М. А. Грищенко. – Д. : Маковецький, 2009. – 112 с.
7. Вакуленко, И. А. Морфология структуры и деформационное упрочнение стали [Текст]: монография / И. А. Вакуленко, В. И. Большаков. – Д. : Маковецький, 2008. – 196 с.
8. Бернштейн, М. Л. Структура деформированных металлов [Текст] : учеб. пособие для вузов / М. Л. Бернштейн. – М. : Металлургия, 1977. – 431 с.

Надійшла до редколегії 19.12.2011.

Прийнята до друку 20.12.2011.

И. А. ВАКУЛЕНКО, С. А. ПЛИТЧЕНКО, Ю. Л. НАДЕЖДИН

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

В работе приведены экспериментальные данные по влиянию режима сварки трением с перемешиванием алюминиевого сплава на характер распределения твердости по сечению сварного шва.

*Ключевые слова:* сталь, растяжение, напряжение, деформация, падение напряжения, деформационное старение, реверсивная деформация

I. A. VAKULENKO, S. A. PLITCHENKO, Y. L. NADEGDIN

## USE OF TECHNOLOGY OF FRICTION STIR WELDING FOR ALUMINUM ALLOYS

This paper presents experimental data on the effect of mode of friction stir welding of aluminum alloy on the distribution of hardness over the cross section of the weld.

*Keywords:* steel, tension, stress, strain, drop stress, deformation ageing, reverse deformation