

Техніка і технології

УДК 621.762

РОЗРОБЛЕННЯ НОВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ ТЕРТЯМ З ПЕРЕМІШУВАННЯМ

¹М.М. Прокопів, ¹О.В. Харченко, ²І.В. Цап, ¹Ю.П. Ущиповський, ²П.М. Присяжнюк

¹Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України;
04074, м. Київ, вул. Автозаводська, 2, тел. (044) 4688632; 4676642; 4329932

²ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 717277,
e-mail: zvd@iung.edu.ua

Подаються результати експериментальних досліджень щодо визначення конструктивних розмірів інструменту для зварювання тертям з перемішуванням відпрацьованих поверхонь кристалізаторів у машинах безперервного розливання сталі; щодо вибору марки твердого сплаву з групи WC-Co для його виготовлення; особливостей зношування та руйнування інструментів залежно від вмісту кобальту. Показано експлуатаційну стійкість інструменту, кінетичні параметри процесу відновлення мідного кристалізатора.

Ключові слова: зварювання тертям з перемішуванням, пін, твердий сплав, вакуумне спікання, адгезійне зношування, мідний кристалізатор.

Приведены результаты экспериментальных исследований по определению конструктивных размеров инструмента для сварки трением с перемешиванием отработанных поверхностей кристаллизаторов в машинах непрерывного разлива стали; по выбору марки твердого сплава из группы WC-Co для его изготовления; особенности износа и разрушения инструментов в зависимости от содержания кобальта. Показано эксплуатационную стойкость инструмента, кинетические параметры процесса восстановления медного кристаллизатора.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием, пин, твердый сплав, вакуумное спекание, адгезионное изнашивание, медный кристаллизатор.

The article deals with the results of the experimental studies on determining the structural dimensions of the tool for friction welding with stirring of the worked mold surfaces in machines for continuous steel pouring; selecting the hard alloy brand from the group of WC-Co for its manufacture; peculiarities of tool wear and destruction depending on the cobalt content. In this article there was shown the operational stability of the tool and kinetic parameters of the copper mold recovery process.

Key words: friction stir welding, pin, hard alloy, vacuum sintering, adhesive wear, copper mold.

Вступ

Відомо, що до кінця минулого сторіччя основною технологією зварювання та наплавлення деталей було аргонно-дугове зварювання. Основний недолік цієї технології – висока температура в зоні плавлення, що призводило до формування неоднорідності за хімічним складом та кристалографічної будови зварного шва зварюваних матеріалів [1].

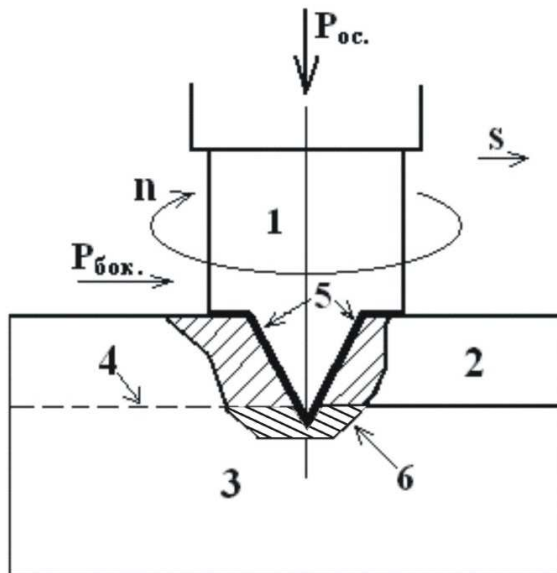
В 1991 р. Британським інститутом зварювання запатентовано технологію зварювання та наплавлення тертям з перемішуванням різних матеріалів [2, 3]. У 1967 р. в СРСР було

видано авторське посвідчення № 195846 на спосіб зварювання тертям, подібний Friction Stir Welding (FSW), але новий спосіб зварювання не отримав розвитку.

На сьогодні ця технологія промислово освоєна та широко застосовується великими фірмами – SAPA (Швеція, Фінляндія), Marine Aluminium (Норвегія), BOEING, BAE System, Lockheed-Martin Laboratories, Reynolds Aluminium (США) та ін., в таких галузях, як: вагоно- та автомобілебудування, суднобудування, авіапромисловість, ракетно-космічна техніка (виготовлення паливних баків космічних ракет), суднобудування (виготовлення кор-

пусів морських суден, підводних човнів та різних ємностей) [2, 4–6]. У 90-х рр. минулого сторіччя ця технологія інтенсивно впроваджувалась у Швеції для промислового виробництва фрагментів мостів з високоміцних алюмінієвих сплавів, вага яких у 10 разів менша, а час зведення на порядок менший, ніж у разі застосування традиційної технології зварювання. Важливим при цьому є суттєве зменшення затрат на доставку деталей та монтаж таких мостів на місці спорудження. За останні 10–15 років у Скандинавії зведено близько 100 таких мостів.

Суть даної технології схематично наведено на рис. 1. Відпрацьовані поверхні деталі попередньо шліфують для видалення дефектів та одержання рівної площини. На шліфовану поверхню деталі (3) накладають мідну або нікелеву плиту необхідної товщини (2). Інструмент (1) спеціальної конструкції закріплюється в шпинделі верстата, аналогічного фрезерному. Під час роботи він заглиблюється в зварювану плиту та поверхню кристалізатора з осьовою силою $P_{ос}$, здійснює обертальний та поступальний рух з боковою силою $P_{бок}$ [7].



1 – інструмент, 2 – матеріал, що наплавляється, 3 – деталь 4 – шов з'єднання, 5 – робоча поверхня інструменту, 6 – зона наплавлення

Рисунок 1 – Схема процесу наплавлення шовного матеріалу на плиту методом тертя з перемішуванням

Під час руху інструменту накладена мідна пластина і пластина кристалізатора нагріваються до температури пластичного стану останньої (6). Пластифікований тепловиділенням метал за рахунок сил тертя закручується відносно осі обертання інструменту, що має спеціальну конструкцію робочої поверхні, змішує в зоні шва обидва матеріали та «закидає» у вільний простір, що утворився за інструментом. Під час руху інструменту стиком зварюваних поверхонь відбувається перемішування та перенесення металу з утворенням зварного шва. Робоча поверхня (5) інструмента працює в умовах тертя при високих температурах, напруженнях

згину. Крім того, для утворення чергового зварного шва (4) (рис. 1) інструмент здійснює періодичний вихід та вхід в зварювану деталь, тобто піддається змінному впливу температури та навантаження. При цьому поверхня наплавленого матеріалу та торець плити, в який входить та виходить робочий, зберігають свої розміри та геометрію.

Аналіз сучасного стану питання

Зварювання тертям з перемішуванням відбувається без об'ємного плавлення в зоні зварювання за рахунок тепла, що виділяється при терті, тому більшість металів і сплавів можуть бути зварені між собою практично без втрати міцності. Ускладнення у випадку застосування такої технології виникають при зварюванні металевих матеріалів, з неметалевими включеннями, зокрема, сталей, що містять сірку.

Основні переваги технології зварювання тертям з перемішуванням:

- відмінні якість та властивості зварного шва (рис. 2 а) за рахунок значно нижчої температури процесу ($0,6 T_{пл.}$) та однорідності структури наплавленого матеріалу;
- зварні стики деталей перед зварюванням не потребують точної підгонки кромки;
- розміри шва після зварювання тертям з перемішуванням, на відміну від електродугового шва, відповідають розмірам деталей, що не потребує додаткової механічної обробки;
- суттєве зменшення ваги зварної конструкції за рахунок відсутності матеріалу, наплавленого з електродів.

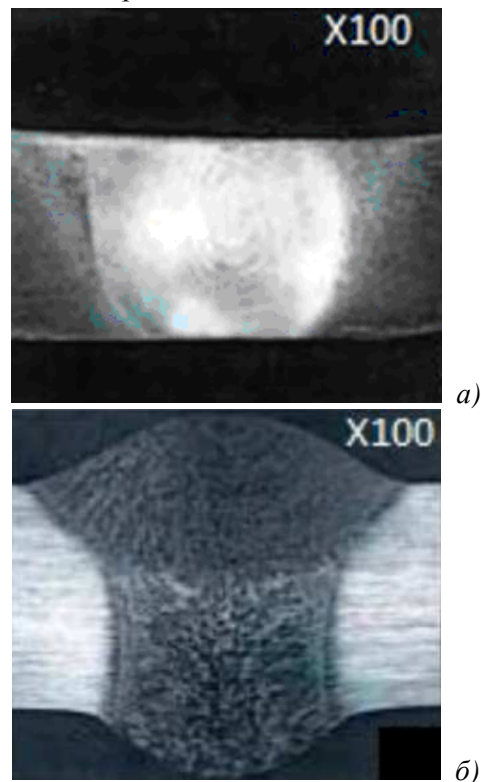


Рисунок 2 – Вид шліфа швів, одержаних тертям з перемішуванням (а) та за традиційною технологією (б)

Так, наприклад, згідно з даними "Italian Institute of Welding" (Італія), вага надмірного алюмінію в швах довжиною 100 км, виконаних за традиційною технологією, становить вісім тонн. Це означає зниження швидкості кораблів і близько 70000 € надмірних витрат на їх виготовлення [6].

У випадку застосування технології зварювання тертям з перемішуванням:

– зменшується на 80 т вага великих кораблів;

– скорочується цикл виробництва та вдвічі здешевлюється кошторис робіт.

За даними норвезької фірми «Fjellstrand» використання готових панелей, що зварюються за методом FSW, пришвидшує виготовлення корпусу катамарана довжиною 60 м на 6-10 місяців.

Особливо важливими є високі показники механічних властивостей з'єднань, отриманих в умовах зварювання тертям з перемішуванням алюмінієвих сплавів марок 1201 та АМг6 при криогенній температурі (рис. 3) [9].

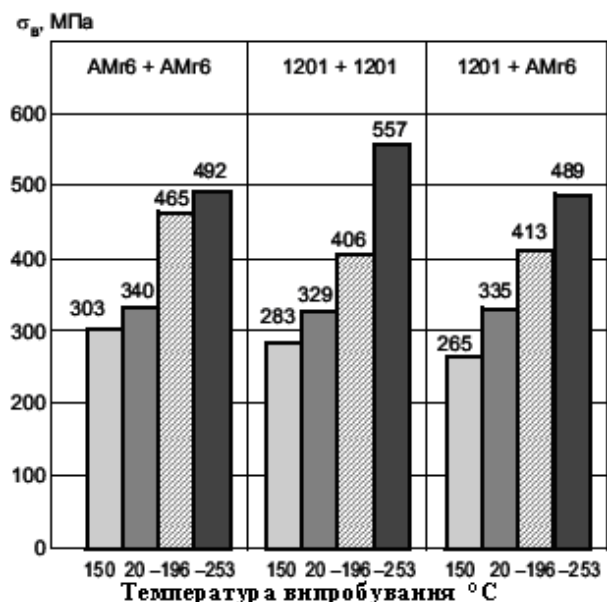


Рисунок 3 – Розподіл тимчасового опору розриву σ_b зразків, отриманих під час зварювання тертям з перемішуванням, за температурою їх випробування (товщина зразків – 4,0 мм; кількість мінімальних випробувань – 5)

Як видно з рис. 3, значення механічних властивостей шва зразків з алюмінієвих сплавів, що виготовлені в умовах зварювання тертям з перемішуванням, із зменшенням температури випробувань до криогенних зростають в 1,5–2,0 рази. Це має дуже важливе значення при виготовленні та ремонті деталей та механізмів, які працюють у середовищі низьких температур, особливо для авіаційної та ракетно-космічної техніки (паливні резервуари та баки).

В Росії розробленням даної технології займаються МДТУ ім. Н.Е.Баумана, ОАО «ВНИИАЛМАЗ та ін. [10]. На ОАО «ВНИИАЛМАЗ» були побудовані циклограми

залежностей зміни режимних та силових параметрів від часу зварювання та встановлено, що для зварювання матеріалів з високою температурою плавлення (сталі, титанові сплави та ін.) необхідно застосовувати їх додаткове нагрівання. Цікаві результати отримані при дослідженні процесу зварювання тертям з перемішуванням у воді.

Слід зауважити, що у Донському державному технічному університеті були виконані розрахунки залежності температури додаткового нагрівання зварюваних матеріалів від часу їх плавлення та глибини зварного шва, а також визначено баланс теплової енергії процесу та обчислено значення температурних полів в об'ємі заготовок, що зварюються [11].

В Південно-Уральському державному університеті проведено дослідження щодо встановлення термодинамічних та силових характеристик процесу зварювання [12].

Факти свідчать, що попри вказані переваги технології зварювання тертям з перемішуванням в порівнянні, наприклад, з технологією електродугового зварювання, в Україні металургійні комбінати досі використовують технологію електродугового відновлення кристалізаторів, яка до того ж не потребує вкладення коштів на придбання додаткового імпортного обладнання. І це при тому, що про неефективність застосування такої технології свідчить про те, що виготовлення одного нового кристалізатора (чотири плити) в Україні (Дніпродзержинський металургійний комбінат, ВАТ «Азовсталь») коштує приблизно 400–450 тис. гривень (ціни 2008 р.). Така велика вартість кристалізаторів здебільшого пов'язана з дуже високими закупівельними цінами на мідь, з якої їх виготовляють [12].

Проте, на даному етапі відсутність спеціального обладнання та інструменту в пострадянських країнах стримує широке впровадження цієї технології. Отже, одна з основних проблем – відсутність спеціального інструменту. Для її вирішення необхідне фінансування та виконання досліджень, розробки та організації серійного виробництва ефективного спеціального інструменту.

Доведено, що формування суцільного наплавленого шва (рис. 2 а) забезпечується спеціальною конструкцією робочої частини інструменту. На сьогодні закордонні фірми, в залежності від умов зварювання, виготовляють до 20 різних видів інструментів. Схематичне зображення найбільш поширених з них наведено на рисунку 4 [13, 14].

Робоча частина складається із торцевої частини та робочого піну (pin with a beveled end – наконечник зі скошеним торцем; застосовується, наприклад, в умовах зварювання тертям з перемішуванням), на які нанесено гвинтові канавки. На сьогодні відсутня інформація щодо вибору конструктивних розмірів інструменту залежно від конкретних умов роботи. В [13, 14] вказується, що діаметр інструменту вибирається меншим, ніж глибина зварювання. Проте, результати досліджень російських вчених не

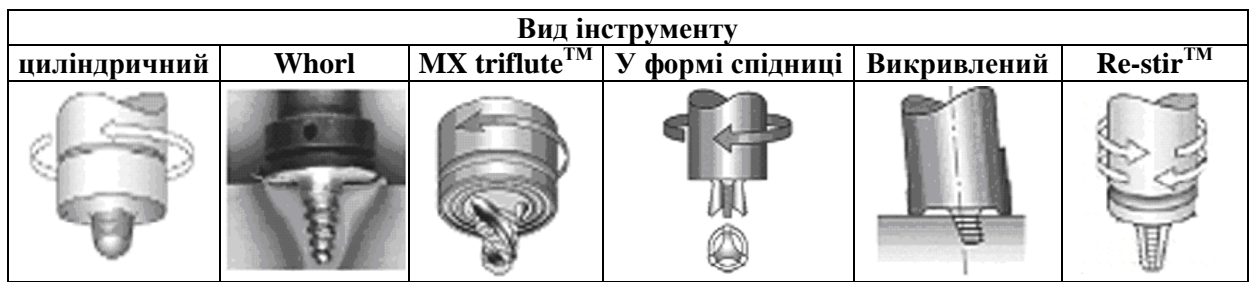


Рисунок 4 – Схематичне зображення основних видів інструменту закордонних фірм для зварювання тертям з перемішуванням [10, 11]

Таблиця 1 – Залежність застосування типу інструментального матеріалу від типу сплавів, що зварюються [10]

Тип сплаву, що зварюється, та його товщина		Тип інструментального матеріалу
Тип сплаву	товщина, мм	
Алюмінієві сплави	<12	Інструментальна сталь, WC-Co *
	<26	MP159 (нікель-кобальтовий сплав)
Магнієві сплави	<6	Інструментальна сталь, WC**
Мідь та мідні сплави	<50	Нікелеві сплави, WC-Co*, ПКНБ***
	<11	Інструментальна сталь
Титанові сплави	<6	WC-Co *
Нержавіючі сталі	<6	ПКНБ, WC-Co*
Низьколеговані сталі	<10	WC-Co*, ПКНБ***
Нікелеві сплави	<6	ПКНБ***

* – карбід вольфраму на кобальтовій матриці;

** WC – карбід вольфраму;

***ПКНБ – полікристалічний кубічний нітрид бору.

підтверджують це. Висоту піни вибирають такою, щоб він захоплював всю товщину зварюваного матеріалу, а у випадку наплавлення шву через лист, – щоб пін заглиблювався приблизно на 2–3 мм в основний матеріал [15].

Як свідчить огляд відкритих джерел інформації, найчастіше використовується інструмент з циліндричним та конічним піном з гвинтовими канавками, який досить простий у виготовленні.

Оскільки умови роботи інструменту при зварюванні тертям з перемішуванням відносяться до важких, то матеріал інструменту повинен мати високу стійкість до механічного руйнування, абразивного та адгезійного зношування в умовах високих температур та навантажень.

На основі численних результатів були визначені види матеріалів, що рекомендуються для виготовлення інструменту залежно від матеріалу, що наплавляється, та його товщини (табл. 1) [13].

Згідно з табл. 1 тверді сплави групи WC-Co займають домінуючу позицію серед інших інструментальних матеріалів, що використовуються для виготовлення інструменту для зварювання. При цьому відсутня інформація про їх хімічний склад, структуру, фізико-механічні властивості та технологію спікання.

Таким чином, у відкритих джерелах інформація про інструментальне забезпечення, конкретні режими технології зварювання тертям з перемішуванням на сьогодні вкрай обмежена і має інформативний характер.

Вирішенням цієї проблеми в Інституті надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України (ІНМ) в співпраці з Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона та науково-виробничою фірмою «Впровадження інженерних зварювальних процесів» (НВФ) почали займатись з 2009 р. в рамках наукових проектів за програмою «Ресурс» 7.1.3 – 2010–2012 рр.; «Ресурс» 7.5.2. – 2013 р.

Мета даної роботи – розроблення технології зварювання тертям з перемішуванням відновлення відпрацьованих поверхонь кристалізаторів у машинах безперервного розливання сталі.

Для досягнення поставленої мети було необхідно розв'язати такі задачі:

1. Визначити оптимальну форму та розміри інструменту у відповідності до наявного обладнання та конструкції шва.

2. Встановити оптимальні технологічні параметри процесу відновлення плит кристалізатора шляхом наплавлення міді методом зварювання тертям з перемішуванням.

3. Визначити стійкість інструмента в залежності від марки сплаву та дослідити причини виходу його з ладу.

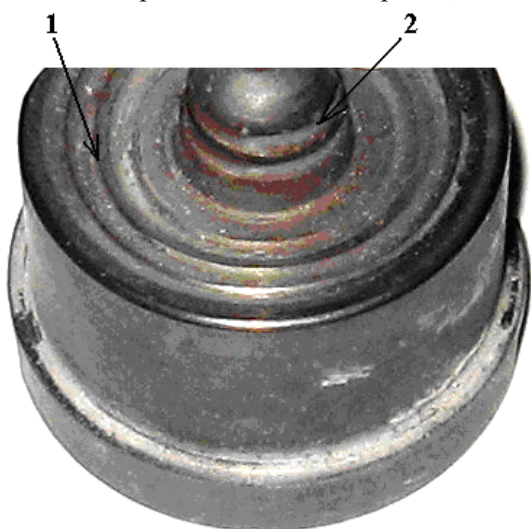
4. Провести апробацію технології в промислових умовах.

Методика досліджень

Лабораторні дослідження проводили шляхом наплавлення мідної плити на мідну плиту.

Використовували для цього вертикально-фрезерний верстат мод. СФ15. Частоту обертів змінювали у діапазоні 850–1400 хв⁻¹, а подачу – 0,1–0,5 мм/об.

Форму та конструктивні розміри інструменту вибирали за рекомендаціями робіт [10, 11], виходячи з розмірів деталі, що наплавляється, та потужностей обладнання. Було вибрано найпростішу циліндричну форму з евольвентними канавками на робочих частинах (рис. 5).



1 – робоча торцева поверхня з евольвентною канавкою; 2 – конусний пін з евольвентною канавкою

Рисунок 5 – Загальний вигляд твердосплавного інструменту

При цьому змінювали розміри евольвентних канавок 1 та піна 2.

Для виготовлення інструменту використовували стандартні суміші групи WC-Co (6, 8, 10, 13 мас. %) виробництва Кіровоградського заводу твердих сплавів (Росія). Спикання здійснювали в вакуумі з відповідними для кожного сплаву термодинамічними параметрами.

Якість шва оцінювали візуально за його однорідністю (відсутністю раковин, пор) як на поверхні, так і в перерізі.

Працездатність інструменту визначали за довжиною якісно виконаного шва. При цьому визначали механізми зношування та руйнування його робочої частини.

Результати дослідження

У ході лабораторних досліджень було визначено оптимальні конструктивні розміри інструменту, при яких формується якісний шов

[16]. Крім того, було визначено мінімально критичну висоту профілю канавок (як результат їх зношення), при якій забезпечується формування якісного шва. Для цих конструктивних розмірів інструменту було визначено параметри процесу зварювання: частоту обертів ($n = 1400 \text{ хв}^{-1}$), подачу ($s = 0,2 \text{ мм/об}$).

Результати лабораторних досліджень з визначення оптимальних конструктивних параметрів інструмента в промислових умовах та його стійкість залежно від марки сплаву при напавленні на плиту кристалізатора мідної плити товщиною 3 мм представлені на рис. 6.

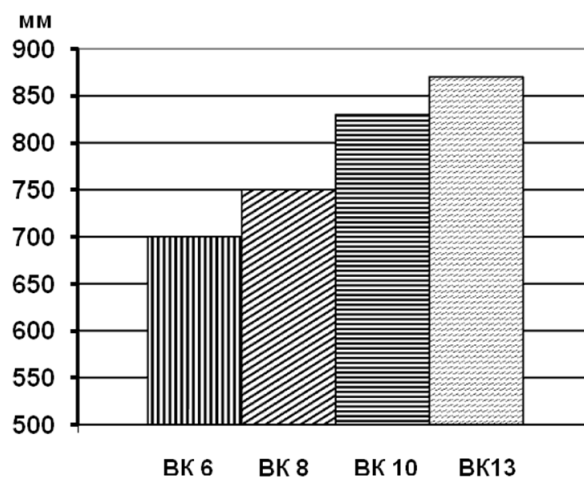


Рисунок 6 – Стійкість інструментів (в мм довжини зварного шва) зі сплавів ВК6, ВК8, ВК10 та ВК13

Як видно з аналізу діаграми (рис. 6), стійкість інструменту корелюється зі збільшенням вмісту кобальту від 6 до 13 % (за мас.).

На рис. 6 зображено вигляд робочої частини інструментів, виготовлених з різних сплавів, після втрати ними працездатності [16].

Аналіз стану відпрацьованих інструментів (рис. 7) дав можливість визначити особливості зношування для всіх видів інструментів: зменшення профілю евольвентної канавки та його діаметра в результаті абразивного зношування, окислення на поверхні робочої поверхні.

Так, інструмент зі сплаву ВК6 і ВК8 (рис. 7, а, б) втрачає працездатність внаслідок макросколювання піна біля основи і по зовнішньому краю бурта (показані стрілками).

Слідів адгезійної взаємодії між поверхнею інструмента зі сплаву ВК6 та матеріалом зварюваної плити не виявлено. На боковій поверхні інструмента зі сплаву ВК8 спостерігається прилипання невеликих (до 1,5 мм) поодиноких частинок металу.

Таким чином, інструмент із стандартних сплавів марок ВК6 і ВК8 втрачає працездатність через передчасне руйнування, що є наслідком низької механічної міцності цих сплавів в умовах дії знакозмінних температур та навантажень. Не повністю зношені евольвентні канавки вказують на відносно непогану їх твердість та стійкість до стирання в цих умовах.



сплави: а, б – ВК 6,8; в, г – ВК 10; д – ВК 13

Рисунок 7 – Вигляд робочої частини інструментів після втрати ними працездатності

Для інструментів із сплавів ВК10 (рис. 7, в, г) і ВК13 (рис. 7, д) характерна втрата працездатності у результаті прогнозованого стирання евольвентної канавки, причому цей процес прямо корелюється зі збільшенням вмісту кобальту. В інструменті зі сплавом ВК10 виявлено незначні мікроруйнування в місцях переходу від циліндричної до торцевої робочої поверхні. Це стає причиною появи раковин, пор в зварному шві, що можна спостерігати в його перерізі.

Отже, величина твердості та механічної міцності твердих сплавів ВК10 і ВК13 забезпечує прогнозовану роботу при відновленні відпрацьованої плити кристалізатора шляхом наварювання мідної плити за технологією зварювання тертям з перемішуванням.

Разом з тим, їх стійкість недостатня, щоб одним інструментом відновити одну плиту кристалізатора для безперервного розливання сталі.

Висновки

Встановлено, що інструменти із твердих сплавів марок ВК6, ВК8, ВК10, ВК13, виготовлених за технологією вакуумного спікання, внаслідок низьких властивостей не підходить для використання в технології зварки тертям з перемішуванням.

Для виготовлення такого інструмента у подальшому необхідно використовувати тверді сплави групи ВК з дрібнозернистою структурою карбідної фази – М або ОМ, які мають більш високі показники міцності та підвищену зносостійкість при теплостійкості 800–850° С, та застосовувати при його виготовленні сучасну технологію вакуумно-компресійного спікання.

Література

- 1 Raghuram V. Fatigue fracture and microstructural analysis of friction stir welded butt joints of aerospace aluminum alloys // Thesis of Master of Science in Mechanical Engineering: Visveswaraiah Technological University. – 2009. – 162p.
- 2 Baumann J. A., Lederich R. J., Mishra R. Evolution of thick section friction stir welding of 7050 aluminium alloys // 4th International Symposium on Friction Stir Welding. Utah (USA), 2003.
- 3 Marie F. et al. Development of friction stir welding of 7000 series extrusions for central wing box applications // 3rd International Symposium on Friction Stir Welding. Kobe (Japan), 2001.
- 4 Leonard R. Corrosion resistance of friction stir welds in aluminium alloys 2014A-T651 and 7075-T651 // 3rd International Symposium on Friction Stir Welding. Kobe (Japan), 2001.
- 5 Santos J. F. Robotic friction stir welding of 7075 alloy (late substitution – manuscript not on CD // 4th International Symposium on Friction Stir Welding. Utah (USA), 2003.
- 6 Фрикционная сварка листовых конструкций из алюминиевых сплавов 1201 и АМг6 / М.М. Штрикман, В.А. Половцев, Г.В. Шилло [и др.] // Сварочное производство. – 2004. – №4. – С. 41–47.
- 7 Friction Stir Welding and Processing / Rajiv S. Mishra, Murray W. Mahoney, editors, ASM International, 2007.
- 8 Tanaka S. et al. Joining dissimilar alloys between AA5083 and A6N01 by friction stir welding // 3rd International Symposium on Friction Stir Welding. – Kobe (Japan), 2001.

9 Служебные характеристики соединений алюминиевых сплавов 1201 и АМг6, выполненных фрикционной сваркой / В.А. Половцев, М.М. Штрикман, Г.В. Шилло и др. // Технология машиностроения. – 2006. – №4. – С.30–34.

10 www.ritm-magazine.ru.

11 Колтышев Р.Р. Расчет температур при сварке трением с перемешиванием алюминиевых сплавов / [Колтышев Р.Р., Шучев К.Г., Крамской А.В.] // Вестник ДГТУ. – 2010. – Т. 10. – №5(48). – С. 648-653.

12 Сафин В.Н. Отработка технологии сварки трением с перемешиванием для соединения труб из алюминиевых сплавов / Сафин В.Н., Щуров И.А., Федоров В.Б. // Вестник ЮУрГУ. – 2012. – №33. – С. 117–121.

13 Materials Science and Engineering A – A study on the SCC susceptibility of friction stir welded AZ31 Mg sheet. M. Bobby Kannana, W. Dietzel, R. Zenga, R. Zettler, J.F. dos Santos / Institute for Materials Research, GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH, D-21502 Geesthacht, Germany/ Chongqing Institute of Technology, Chongqing 400050, China; accepted 15 January 2007.

14 Штрикман М.М. Состояние и развитие процесса сварки трением линейных соединений. Ч.1, 2, 3 // Сварочное производство. – 2007. – № 9(874), №10(875), № 11(876).

15 Зеленин В.И. К вопросу о повышении износостойкости медных плит кристаллизаторов / Зеленин В.И., Полищук М.А., Лукаш В.А., Прокопий Н.М., Харченко О.В. и др. // Породо-разрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. – Киев: ИСМ им. В.Н.Бакуля НАН Украины, 2011. – Вып. 14. – С. 533–536.

16 Визначення ефективних тисків азоту при спіканні дрібнозернистих інструментальних твердих сплавів WC-Co з підвищеною зносостійкістю: автореф. дис. ...канд. техн. наук: 05.02.01 / О.В. Харченко; НАН України, Ін-т надтвердих матеріалів ім.В.М.Бакуля. – Київ: – 2014. – 20с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії
22.10.15*

*Рекомендована до друку
професором Райтером П.М.
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
д-ром техн. наук Фесенком І.П.
(Інститут надтвердих матеріалів
ім. В.М.Бакуля НАН України, м. Київ)*