

ЕКСПЛУАТАЦІЙНА СТІЙКІСТЬ ІНСТРУМЕНТУ ІЗ ДРІБНОЗЕРНИСТОГО СПЛАВУ WC-8Co ПІСЛЯ ВАКУУМНО-КОМПРЕСІЙНОГО СПІКАННЯ В РІЗНИХ УМОВАХ ЗВАРЮВАННЯ ТЕРТЯМ З ПЕРЕМІШУВАННЯМ

¹М.М. Прокопів, ¹О.В. Харченко, ¹В.А. Лукаш, ²І.В. Цап

¹Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України;
04074, м. Київ, вул. Автозаводська, 2, тел. (044) 4688632; 4676643; 4329932

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

Подаються результати дослідження впливу умов охолодження при вакуумно-компресійному спіканні під тиском азоту 2,5 МПа та у вакуумі на стійкість і механізми зношування інструмента із дрібнозернистого твердого сплаву групи WC-8Co в умовах неперервного та перервного (вхід – вихід) режимах наварювання методом тертя з перемішуванням мідних плит. Показано позитивний вплив охолодження під тиском газу 2,5 МПа на стійкість інструмента в умовах неперервного, а охолодження у вакуумі – в умовах перервного режиму зварювання. За результатами кількісного аналізу десорбції газів із твердого сплаву, охолодженого в різних умовах, дано пояснення їх впливу на стійкість та механізми зношування в різних умовах наварювання.

Ключові слова: твердий сплав, структура, властивості, вакуумно-компресійне спікання, стійкість, мідь, наварювання тертям з перемішуванням.

Представлены результаты исследования влияния условий охлаждения при вакуумно-компрессионном спекании под давлением азота 2,5 МПа и в вакууме на устойчивость и механизмы изнашивания инструмента из мелкозернистого твердого сплава группы WC-8Co в условиях непрерывного и прерывного (вход - выход) режимах наваривания методом трением с перемешиванием медных плит. Показано положительное влияние охлаждения под давлением газа 2,5 МПа на стойкость инструмента в условиях непрерывного, а охлаждения в вакууме - в условиях прерывистого режима сварки. По результатам количественного анализа десорбции газов из твердого сплава, охлажденного в различных условиях, дано объяснение их влияния на устойчивость и механизмы изнашивания в различных условиях наваривания.

Ключевые слова: твердый сплав, структура, свойства, вакуумно-компрессионное спекание, устойчивость, медь, наваривания трением с перемешиванием.

The research results of the influence of the cooling conditions during the vacuum-compressive sintering under the pressure of nitrogen of 2.5 MPa and the influence on the durability and wear mechanisms of the WC-8Co fine-grained alloy tool under the conditions of continuous and interrupted (input-output) modes of welding by the method of dragging with stirring of the copper plates have been described. The positive influence of cooling under pressure of gas of 2.5 MPa on the tool durability under the conditions of continuous mode of welding, and cooling in a vacuum - under the conditions of the interrupted mode of welding has been shown. On the basis of quantitative analysis of the gas desorption of hard alloy metals cooled in different conditions, there has been an explanation of their impact on durability and wear mechanisms in different welding conditions.

Key words: hard alloy metal, structure, properties, vacuum-compressive sintering, durability, copper, dragging with stirring.

Вступ

Україна на сьогодні залишається однією з провідних машинобудівних країн Європи. Подальший її прогрес нерозривно пов'язаний з розвитком нових високоефективних технологій, зокрема в галузі з'єднання конструкцій.

До таких технологій, в першу чергу, відноситься технологія зварювання та наплавлення тертям з перемішуванням, яка запатентована 1991 р. Британським інститутом зварювання [1, 2]. За показниками технологічності, економічності та екологічності значно випереджає традиційні технології, зокрема, найбільш поширену технологію електродугового зварювання [3].

Підтвердженням цього є широке практичне застосування фірмами – SAPA (Швеція, Фінляндія), Marine Aluminium (Норвегія), BOEING, BAE System, Lockheed-Martin Laboratories, Reynolds Aluminium (США) та ін., в таких галузях, як: вагоно-, автомобіле-, суднобудування, авіапромисловість, ракетно-космічна техніка (виготовлення паливних баків космічних ракет), суднобудування (виготовлення корпусів морських суден, підводних човнів та різних смонтей) [5–6].

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона розробив ряд нових технологій зварювання на основі плазмово-дугового та електронно-променевого зварювання [4].

Попри на інтенсивні дослідження в цій області електродугове зварювання і досі залишається однією із основних технологій для з'єднання різних конструкцій в базових галузях України.

Отже, необхідність розроблення вітчизняної технології зварювання тертям з перемішуванням є актуальною технічною задачею в модернізації народного господарства України.

Виходячи із цього, з 2010 по 2013 рр. за програмою «Ресурс» ІНМ ім. В.М. Бакуля спільно з Інститутом електрозварювання ім. Патона проводилось дослідження щодо розроблення вітчизняної технології зварювання міді тертям з перемішуванням. За основу для проведення роботи використано таку інформацію [5-7]:

- 30 видів найбільш поширених у світовій практиці конструкцій інструменту та рекомендації щодо їх вибору для конкретних матеріалів зварювання;

- використання твердого сплаву групи WC-Co для виготовлення інструменту;

- режими технології процесу зварювання та технічне оснащення;

- температурні поля в зоні шва та на поверхні інструменту.

Однак інформація стосовно вибору марки матеріалу, її структури та властивостей, а також технології виготовлення інструменту для різних умов роботи відсутня. Тому основна задача, яка вирішувалась нами в рамках проекту «Ресурс», стосувалась виключно визначення хімічного складу та умов спікання твердого сплаву групи WC-Co [7], за яких забезпечувалась би максимальна стійкість інструменту під час зварювання міді. До того ж виконувалась конкретна практична задача – відновлення робочої поверхні відпрацьованого мідного кристалізатора безперервного розливання сталі шляхом наварювання мідної пластини розміром 1200x300x5 мм [10, 13]. Як виявилось, в умовах формування зварного шва вздовж сторони плити розміром 1200 мм максимальну стійкість серед стандартних твердих сплавів із вмістом Co в інтервалі 6-13% виявив інструмент із твердого сплаву ВК8. За даних умов було виконано 54 входи та виходи із зони шва. При цьому навантаження на інструмент знижувалась до нуля, а температура на його робочій поверхні змінювалась в інтервалі 650–300°C. Тобто інструмент працював в умовах термомеханічного циклічного навантаження, а втрата його працездатності відбувалась внаслідок стирання евольвенти на робочій частині через недостатню зносостійкість. В [11] показано переваги інструменту, спеченого у вакуумі, порівняно з інструментом після спікання в метано-водневому середовищі.

Відомо, що одним із шляхів підвищення зносостійкості інструментального матеріалу є зменшення розміру карбідного зерна в структурі твердого сплаву, підвищення його фізико-механічних властивостей шляхом вакуумно-компресійного спікання (ВКП) під тиском до 2,5МПа газу, а також зменшення адгезійної,

дифузійної активності до оброблюваного матеріалу [12].

Як свідчать результати досліджень [17, 10], умови охолодження (у вакуумі та під тиском газу) після ВКП майже не впливають на структурні та фізико-механічні властивості твердого сплаву, однак по-різному впливають на стійкість різального інструмента в умовах безперервної та перервної лезової обробки сталі 40Х. Це пов'язано, в першу чергу, із різною активністю твердого сплаву до адгезійної та дифузійної взаємодії з оброблюваним матеріалом.

У процесі наварювання чи зварювання із зміною кількості входів та виходів (різні розміри деталей) інструмент буде також піддаватись впливу різних механізмів деструкції його робочої поверхні, що вплине на кінцеву працездатність. Закономірно, що при цьому, крім хімічного складу, структурних та фізико-механічних властивостей матеріалу інструменту важливу роль відіграватимуть його адгезійна активність до наварюваного матеріалу, а також активність до окислення.

Така інформація на сьогодні нам невідома.

Метою даної роботи було дослідження експлуатаційної стійкості інструмента із дрібнозернистого сплаву ВК8М після вакуумно-компресійного спікання під тиском 2,5 МПа охолодженого під тим же тиском газу та у вакуумі. Режими наварювання мідних плит – безперервний та циклічний (різна кількість циклів).

Методика дослідження

Схема наварювання двох мідних плит (рис.1) з розмірами 300x1200x5мм. Розміри плити були вибрані з необхідності моделювання різних режимів наварювання: P_{H1} – безперервний; P_{H2} і P_{H3} – циклічні. При цьому режим P_{H2} – для наварювання вздовж сторони довжину 1200 мм, а режим P_{H3} – вздовж сторони розміром 300 мм. Таким чином, у режимі P_{H3} кількість виходів та входів інструменту в плиту буде в 4 рази більше, ніж у режимі P_{H2} .

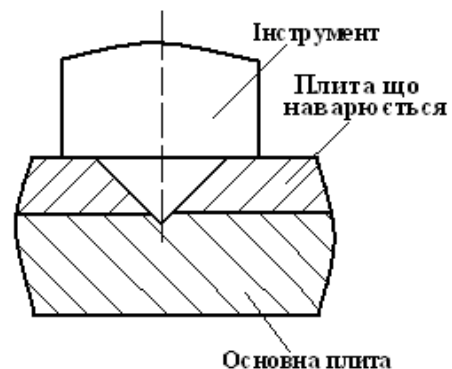


Рисунок 1 – Схема розміщення плит з інструментом у процесі роботи

Використовували для цього вертикально-фрезерний верстат мод. СФ15, оснащений додатковим пристроєм для кріплення плит.

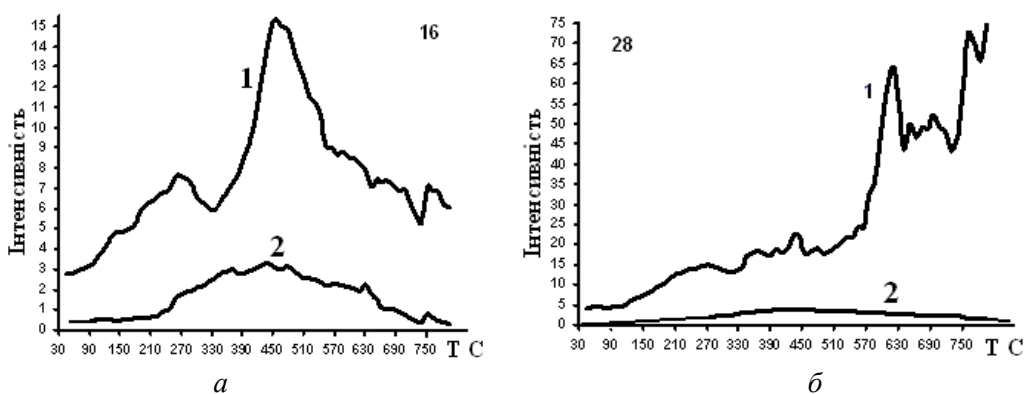


Рисунок 2 – Графіки термодесорбційних спектрів, розчинених в об’ємі сплаву газів після ВКС ($p=2,5$ МПа) і охолодженого під тиском газу (P1) (1) та у вакуумі (P2) (2)

Параметри процесу наварювання, взяті із [12, 13, становили: кількість обертів $n = 1450$ хв⁻¹; подача $s = 80$ мм/хв., кут нахилу інструмента проти напрямку руху – 2° .

Конструкцію робочої частини інструмента було вибрано як одну із найпростіших із широкої номенклатури конструкцій, наведених в [19, 10].

Для виготовлення інструмента використовували тврдосплавну дрібнозернисту суміш WC-Co (BK8M) виробництва КЗТС (Росія). Вибір BK8M обумовлений більшою зносостійкістю, ніж твердий сплав BK8, що використовувався в роботі [18].

Спінання здійснювали за розробленими режимами технології вакуумно-компресійного спікання (ВКС) під тиском $p=2,5$ МПа азоту підвищеної чистоти [12].

При цьому одну партію інструмента охолоджували під тим же тиском азоту P1 (3 МПа), а другу – у вакуумі P2 (13,3 Па).

Охолодження від температури спікання до 700°C здійснювали зі швидкістю $3-5$ град./хв., а нижче цієї температури – при виключеному джерелі нагрівання.

Характеристики структури та фізико-механічних властивостей спеченого твердого сплаву визначали за стандартними методиками.

Термодесорбцію газів визначали згідно з [6]. Мас-спектри газової фази, що змінюється при нагріванні зразка, записували на мас-спектрометром MX 7304A (фірми "Селмі", м. Суми) за співвідношення маси до заряду (m/z) = 10 – 60, що дає змогу побудувати термодесорбційні криві для кожної речовини окремо. Швидкість нагрівання зразка становила $14^\circ\text{C}/\text{хв.}$ за температурного інтервалу $40-800^\circ\text{C}$.

Стійкість інструмента визначали за довжиною сформованого однорідного зварного шва, а причини втрати ним працездатності візуально оцінювали за виглядом його робочої поверхні.

Результати дослідження та обговорення

Поверхня зразків після охолодження у вакуумі має світліше забарвлення, ніж при охолодженні під тиском газу, що свідчить про різні процеси, які відбуваються на його поверхні в процесі охолодження.

Проведені дослідження показали значне зменшення адсорбованих газів у всьому діапазоні співвідношення маси до заряду (m/z) = 10–60 в об’ємі зразків, охолоджених у вакуумі. На рис. 2 наведено термодесорбційні спектри іонів газів із співвідношенням маси до заряду (m/z) 16 (а) та 28 (б), що належать основним молекулам відповідно води та азоту.

Наведені термодесорбційні графіки свідчать про зменшення кількості адсорбованих іонів води (рис. 2 а) та азоту (рис. 2 б) в об’ємі сплавів при охолодженні у вакуумі порівняно з охолодженими під тиском газу. Характеристики структури та фізико-механічні властивості сплаву BK8 М спечених зразків наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Фізико-механічні та структурні характеристики зразків із сплаву BK8 М

Характеристика сплаву	Технології спікання	
	P.1	P.2
Коерцитивна сила H_c , кА/м	17,6	17,1
Густина γ , г/см ³	14,75	14,76
Твердість, HRA	90,1	90,1
Границя міцності під час згинання R_{bm} , МПа	1980	2245
Коефіцієнт тріщиностійкості K_{IC} , МПа·м ^{1/2}	12,8	13,3
Середній розмір зерна d_{wc} , мкм	1,7	1,68
Теплопровідність, Вт/(м·К)	58	55
Об’ємна пористість, %	A2 0,2	A2 0,2
Кількість пор розміром > 50 мкм	–	–
Розмір окремих великих зерен карбиду вольфраму та їх скупчень	8–15	10–15
Розмір кобальтової фази, мкм	0,3–0,5	0,32–0,6

Аналізуючи дані таблиці 1 компресійне спікання під тиском азоту 2,5 МПа і охолодження у вакуумі у порівняно з охолодженням під цим самим тиском зразків сплаву BK8 М незначною мірою збільшує тільки границю

міцності під час згинання та тріщиностійкість, але не впливає на структурні характеристики.

Аналізуючи таблицю 1, слід зазначити, що інструмент, виготовлений за 2 варіантом за механічними властивостями, не враховуючи адгезійну та хімічну активність, повинен мати більшу стійкість при наварюванні.

Діаграми стійкості інструменту для різних режимів наварювання наведено на рис. 3.

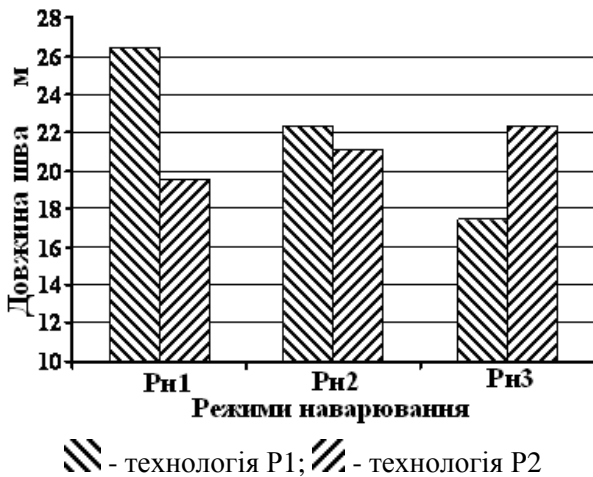


Рисунок 3 – Діаграма стійкості інструмента із сплаву BK8 M, виготовленого за різними технологіями, при наварюванні двох мідних плит в різних умовах роботи

При наплавленні міді в умовах безперервної роботи (P_{n1}) більшу стійкість (26,5 м якісного шва) виявлено у інструмента, виготовленого за технологією (P1). Стійкість інструмента, охолодженого в вакуумі, менша в 1,35 рази. В умовах режиму P_{n2} стійкості інструментів, охолоджених в різних умовах, приблизно рівні. Натомість в умовах наварювання режиму P_{n3} більшу в 1,57 разів стійкість виявив інструмент, що охолоджувався у вакуумі.

На рис. 4 зображено характерні види зношування інструменту після втрати працездатності.

Аналіз поверхонь відпрацьованих інструментів, охолоджених в вакуумі (P2), свідчить, що основною загальною причиною втрати його працездатності як в умовах безперервного, так і

циклічного зварювання міді є зношення евольвенти робочої частини (рис. 4 а). При цьому ж безперервному режимі зварювання P_{n1} виявлено локальні налипання міді, а також поодинокі місця виривів евольвентної поверхні інструмента (рис. 4 б). Такий результат за меншої механічної міцності твердого сплаву, охолодженого під тиском газу, можна пояснити більшою фізичною та хімічною інертністю його до міді.

В режимах зварювання P_{n2} і P_{n3} втрата працездатності інструмента P2 відбувається виключно за рахунок зношення робочої поверхні.

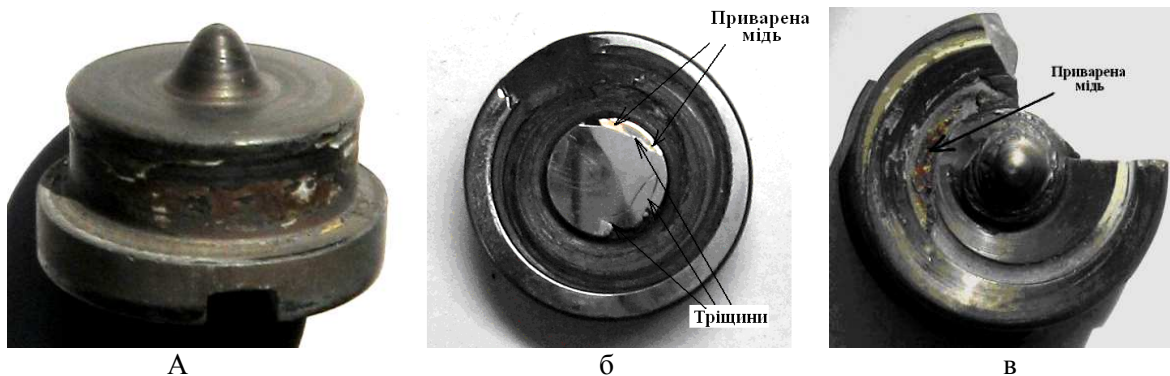
Втрата працездатності інструмента, охолодженого під тиском азоту P1, що працював у режимі зварювання P_{n1}, відбулася також внаслідок тільки процесу зношення. В режимі зварювання P_{n2}, окрім класичного зношення, виявлено поодинокі сколи на периферійній частині інструменту. В режимі P_{n3} втрата працездатності відбулася в результаті передчасного катастрофічного, без повного зношення евольвентної частини руйнування інструмента (рис. 4 в). Важливим є наявність нальоту світлого кольору на поверхнях обох партій інструмента, що свідчить про окислення повітрям навколишнього середовища.

Висновки

Експлуатаційна стійкість інструмента із сплаву BK8M після ВКС під тиском азоту 2,5МПа та охолодженого в різних умовах визначаються таким чином:

- в неперервному режимі процесу зварювання мідних плит більшу стійкість виявив інструмент після охолодження під тиском азоту в порівнянні з інструментом, охолодженим у вакуумі, що зумовлено його більшою фізичною та хімічною інертністю, яка забезпечується наявністю абсорбованих газів у об'ємі та на поверхні інструмента;

- в умовах циклічного режиму зварювання стійкість інструмента після охолодження під тиском газу зменшується, а стійкість інструмента, охолодженого у вакуумі, збільшується. При цьому вказана різниця збільшується зі збільшенням числа циклів, що пояснюється більшою міцністю в умовах високотемпературної втоми, яка забезпечується десорбцією газів.



а – зношування евольвентних канавок; б – адгезійне налипання міді та локальні вириви на поверхні піна; в – руйнування інструменту та окислення робочої поверхні

Рисунок 4 – Характерні види зношування інструмента після втрати працездатності

Література

- 1 W. M. Thomas et al., 1991. US Patent No. 5,460,317.
- 2 By Rajiv S. Mishra, Murray W. Mahoney: Friction stir welding and processing, ASM International. ISBN 978-0-87170-848-9. 352 p.
- 3 Johnsen M. R. Friction Stir welding takes off at Boeing // Welding Journal. – 1999. – No 2. – P. 35–39.
- 4 <http://paton.kiev.ua/ru/o-nas/istoriya/85-institut-elektrosvariki-im-patona>
- 5 Friction Stir Welding and Processing / eds by Rajiv S. Mishra, Murray W. Mahoney. – ASM International, 2007.
- 6 Штрикман М. М. Стан і розвиток процесу зварки тертям лінійних сполук. Ч. 1 / М. М. Штрикман // Зварювальне виробництво. – 2007. – № 9 (874).
- 7 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, JF 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.
- 8 Котлышев Р.Р. Расчет температур при сварке трением с перемешиванием алюминиевых сплавов / Р.Р. Котлышев, К.Г. Шучев, А.В. Крамской // Вестник ДГТУ. – 2010. – Т.10. – № 5(48). – С. 648-654.
- 9 Вплив умов спікання на стійкість інструменту для наплавлення міді тертям з перемішуванням із сплаву групи WC-Co / М.М. Прокопів, О.В. Харченко, Ю.П. Ущиповський // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. – К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2015. – Вып. 18. – С. 494–499.
- 10 Mishra R. S. and Mahoney M. W. Friction stir welding and processing // Materials Park, OH, ASM International. – 2007.
- 11 Прокопів Н.М. Определение стойкости мелкозернистого твердого сплава WC-10Co при циклическом ударном точении стали. Резание и инструмент в технологических системах / Н.М. Прокопів, В.П. Бондаренко, О.В. Харченко, Ю.А. Мельничук // Международный научно-технологический сборник (Харьков, НТУ «ХПИ»), – 2012. – С. 225 – 235.
- 12 Харченко О.В. Визначення ефективних тисків азоту при спіканні дрібнозернистих інструментальних твердих сплавів WC-Co з підвищеною зносостійкістю: Дис. на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. – К.: ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України, 2014.
- 13 Kolaska H. Use of the combined sintering HIP process in the production of hard metals and ceramic / Kolaska H., Dreyer K., Schaaf G. // pmi. – 1989. – v. 21, № 1. – P. 22 – 28.
- 14 Reynolds A. P. and Lockwood W. D. Digital image correlation for determination of weld and base metal constitutive behavior // Proc. 1st Int. Conf. on 'Friction stir welding'. – Thousand Oaks, CA, USA, June 1999, TWI.
- 15 К вопросу о повышении износостойкости медных плит кристаллизаторов / В.И. Зеленин, М.А. Полищук, В.А. Лукаш, М.М. Прокопів, О.В. Харченко [и. др.] // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. – К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2011. – Вып. 14. – С. 533–536.
- 16 Prado R. A. Tool wear in the friction stir welding of aluminum alloy 6061z20% Al₂O₃: a preliminary study / R. A. Prado, L. E. Murr, D. J. Shindo and K. F. Soto // Scr. Mater. – 2001, 45, 75–80.
- 17 Sutton M. A. Mode I fracture and microstructure for 2024-T3 friction stir welds / M. A. Sutton, A. P. Reynolds, B. Yang and R. Taylor // Mater. Sci. Eng. A. – 2003, A354, 6–16.
- 18 Панов В.С. Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделий из них / В.С. Панов, А.М. Чувілін, В.А. Фальковський. – М.: МИСиС, 2004. – 464 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії
02.09.17

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