

6. Babitha, K.K., Sreedevi, A., Priyanka, K.P., et al. (2015). Structural characterization and optical studies of CeO₂ nanoparticles synthesized by chemical precipitation. *Indian Journal of Pure & Applied Physics*, 53, 596–603.
7. Suratwala, T.I. (2018). *Materials Science and Technology of Optical Fabrication*. USA, Hoboken Wiley.
8. Jones, G.A., & Bradshaw, D.S. (2019). Resonance Energy Transfer: From Fundamental Theory to Recept Applications. *Front. Phys.*, 7, 100, 1–19.
9. Singldinger, A., Gramlich, M., Gruber, C., et al. (2020). Nonradiative Energy Transfer between Thickness-Controlled Halide Perovskite Nanoplatelets. *ACS Energy Lett.*, 5, 1380–1385.

УДК 621.793

DOI: 10.33839/2708-731X-24-1-424-430

М. А. Полещук, В. І. Зеленін, А. Ю. Тунік, Л. І. Адєсва, кандидати технічних наук;
І. М. Попович, інж.

*Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, вул. Казимира Малєвича,
м. Київ, 03150, e-mail: office@paton.kiev.ua*

ЗАСТОСУВАННЯ СПОСОБУ ЗВАРЮВАННЯ ТЕРТЯМ З ПЕРЕМІШУВАННЯМ ДЛЯ НАПЛАВЛЕННЯ МІДНИХ КРИСТАЛІЗАТОРІВ

Розроблено технологію наплавлення мідних кристалізаторів способом тертя з перемішуванням (НТП), що дозволяє наплавляти на кристалізатори мідь з наступним нанесенням зносостійкого металевого покриття.

Показана можливість наплавлення нікелю на мідну плиту методом тертя з перемішуванням з використанням інструменту з кубічного нітриду бору та твердосплавних матеріалів, що містять вольфрам. Визначено температури і зусилля, що діють при наплавленні міді і нікелю тертям з перемішуванням на мідні плити кристалізаторів.

Мета цієї роботи – розробка технології нанесення міді і нікелю на мідні плити наплавленням тертям з перемішуванням (НТП).

Ключові слова: *наплавка, тертя з перемішуванням, мідна плита, відновлення, кристалізатор, інструмент, пін, мідь, нікель.*

Розроблений в інституті TWI (Великобританія) процес зварювання в твердій фазі – зварювання тертям з перемішуванням (СТП) – був використаний в Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України для наплавлення мідних плит охолодження кристалізаторів безперервного лиття заготовок, одного з головних вузлів установок безперервного розливання сталі [1].

При безперервному розливанні сталі в зоні її контакту з мідною плитою кристалізатора під впливом високої температури і тиску спостерігається значний знос і руйнування контактної поверхні плити. Продовжити термін їх експлуатації можна нанесенням на робочу поверхню мідних кристалізаторів чистої міді і нікелю в якості зносостійких покриттів [2].

Відновити креслярський розмір мідної плити звичайним наплавленням вкрай складно, це пов'язано з попаданням при цьому процесі легуючих матеріалів або газів, які різко знижують теплопровідність міді.

Як відомо, чим чистіше мідь в плиті кристалізатора, тим вище її теплопровідність. Відмінність теплопровідності вакуумної міді від теплопровідності міді з вмістом кисню понад 0,1% становить майже три рази.

Одним з характерних дефектів, через який кристалізатори знімаються з експлуатації, є знос боковин в нижній частині охолоджуючих плит глибиною 2-7 мм. Зона зносу розташовується клиноподібно з боків плити широкої частиною до низу.

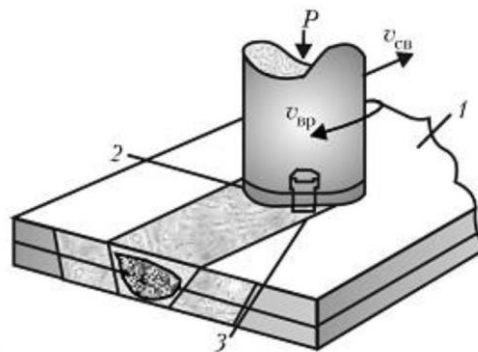
Наявність таких дефектів призводить до неприпустимості їх подальшої експлуатації.

Від інших видів зварювання тертям і тиском зварювання тертям з перемішуванням відрізняється способом нагріву, точніше, способом введення тепла в деталі, що зварюються. При СТП кінетична енергія безпосередньо перетворюється в теплову, причому генерування тепла відбувається строго локалізовано в тонких приповерхневих шарах металу [3].

На рис. 1 наведені установка і схема з'єднання напускового типу СТП різнорідних металів.



а



б

Рис. 1. Установка (а) і схема процесу СТП (б): 1 – виріб; 2 – запічники; 3 – пін інструменту спеціального профілю; $V_{св}$ – швидкість зварювання; $V_{об}$ – швидкість обертання

У даній роботі авторами способом СТП зварені і досліджені сполуки Cu-Cu і Ni-Cu, елементи яких відрізняються необмеженою розчинністю, з метою використання їх для відновлення розмірів мідних плит кристалізаторів МБЛЗ і подальшого їх зміцнення нанесенням нікелю або нікелевих сплавів. Були отримані і вивчені основні зони зварювання. Макроструктура міді, нанесеної на зразок мідної плити, приведена на рис. 2.

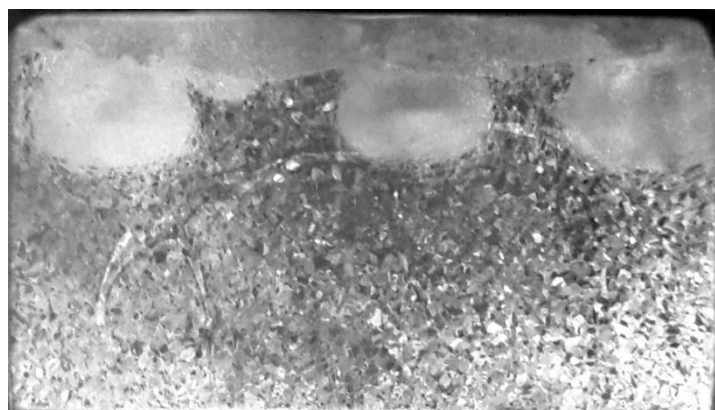


Рис. 2. Макроструктура нанесеного металу на модельний об'єкт з міді марки М1 методом СТП, $\times 5$

Як видно на рис. 2, був отриманий якісний шов з відсутністю дефектів у вигляді пір, тріщин, несучільностей. У зоні динамічної рекристалізації спостерігається значне подрібнення зерен. На рис. 3 приведена гістограма розподілу мікротвердості по зварювальному шву мідь-мідь.

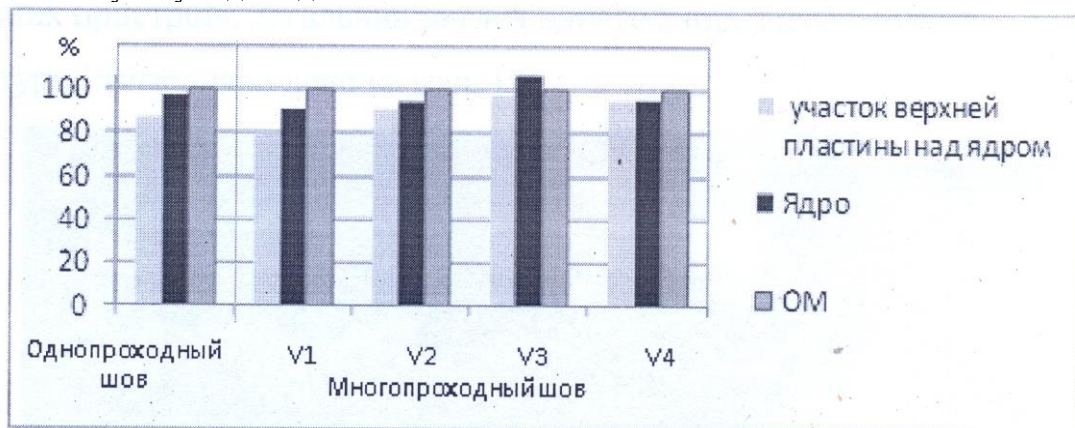
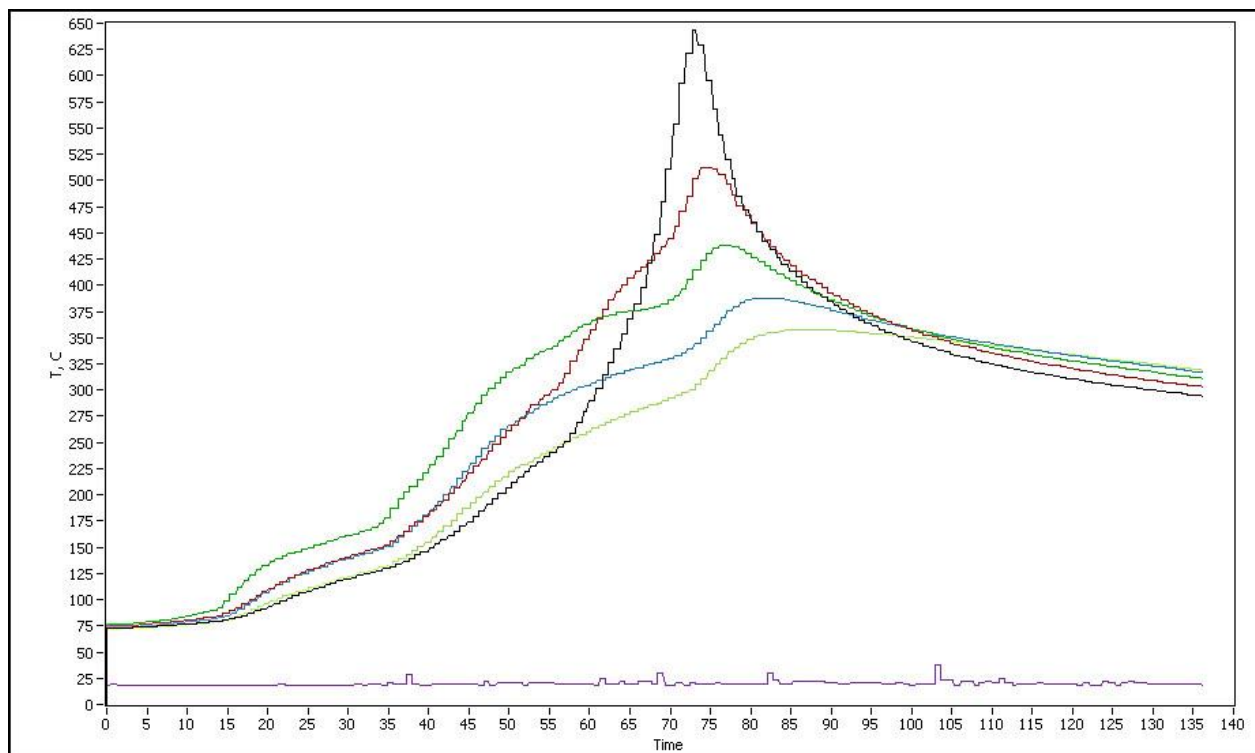


Рис. 3. Гістограма розподілу мікротвердості по зварювальному шву мідь-мідь

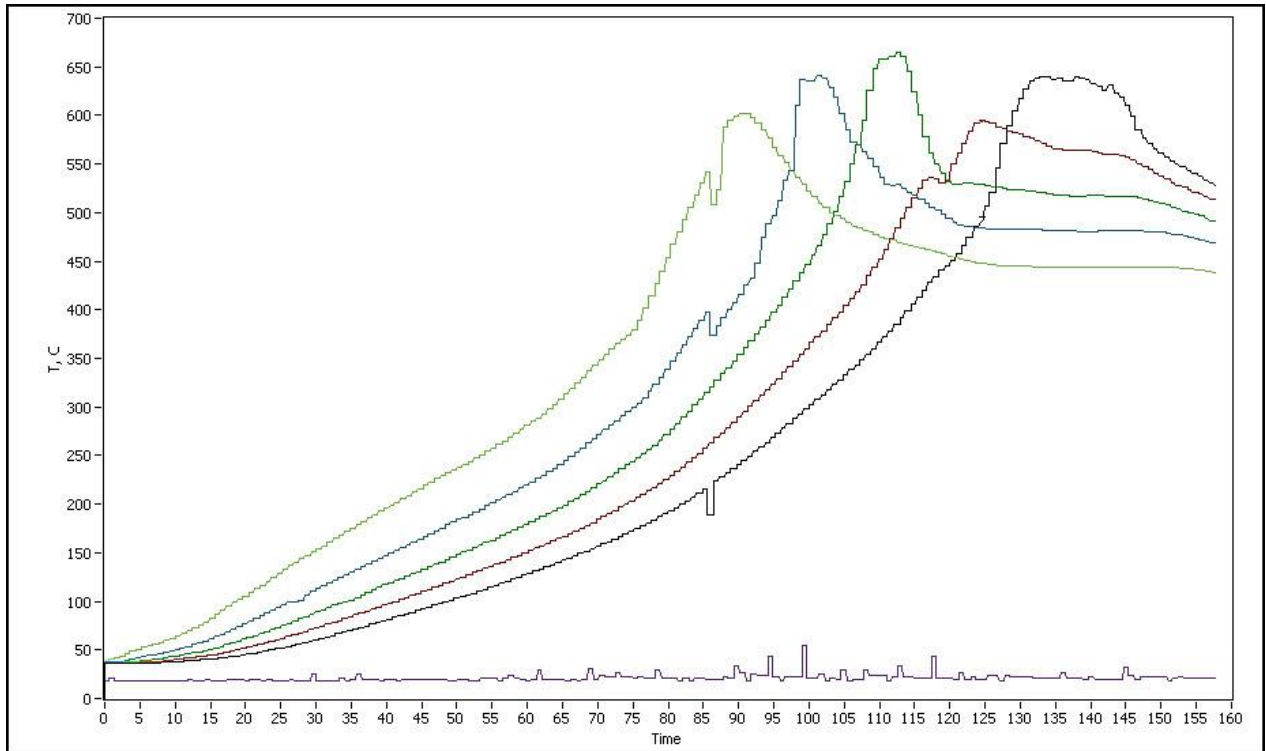
У зв'язку з високою пластичністю міді, не дивлячись на різницю в розмірах зерен одержуваних структур, особливих відмінностей в механічних властивостях не спостерігається.

Як показали наші дослідження міцності на розрив, на згин, ударної в'язкості, всі механічні властивості знаходилися на рівні відповідних показників основного металу. Мікротвердість досягала 80–90% основного металу і збільшувалася до 100% основного металу з ростом оборотів інструмента. Так, при швидкості переміщення 110 мм / хв і швидкості обертів інструмента 140 об/хв утворилося з'єднання практично рівномірне основному металу.



а

Рис. 4. Розподіл температури по ширині зварного шва (а) і по глибині зварного шва (б)



б

Рис. 4. Закінчення

Паралельно в процесі наплавлення проводилися виміри температур процесу (рис. 4), які були вище температури рекристалізації, однак не перевищували температури плавлення.

Другий етап роботи стосувався наплавлення нікелю на мідь.

Загальний вигляд мікрошліфа зразка міді з нанесеним нікелем наведено на рис. 5 (поперечний розріз).



Рис. 5. Мікроструктура з'єднання нікель - мідь, отриманого СТП, подовжній перетин травлення ($\times 25$)

Спостерігається перемішування шарів нікелю і міді без активної взаємодії.

У зоні з'єднання нікелю та міді відбувається взаємне проникнення цих металів на глибину до 3 мм. Масоперенос металів відзначений у вигляді взаємопроникаючих смуг, що чергуються, спрямованих в бік руху пін інструменту (рис. 5).

Методом РСМА встановлено, що на межах зерен відбувається незначна дифузія міді в нікель.

Отримані результати дали можливість розробити новий процес зварювання в твердій фазі для відновлення мідних кристалізаторів безперервного розливання сталі, а також для нанесення на них нікелевих і нікель-хромових покриттів.

Проведення СТП здійснювалося досить просто. На наплавлену ділянку сегмента мідної плити, що попередньо відфрезеровано до певного рівня, накладається мідна пластина необхідного складу і форми і надійно закріплюється за допомогою струбцин. Потім обертається циліндричний інструмент з твердих сплавів на основі вольфраму ВК-10 з виступаючим штирем, впроваджується в пластину, створюючи перемішування металу, який наплавляється, з металом основи [4].

Отримана структура нанесеного металу щільна, тріщини, непровари і пори відсутні. Металографічні дослідження підтверджують цей висновок. Заміри мікротвердості нанесеної міді показали ідентичність твердості міді самої плити. Аналізи показали, що розчинення кисню в нанесеному шарі не спостерігалось.

Заключним етапом зміцнення мідних плит кристалізаторів є нанесення 3 мм шару нікелю Н1 методом СТП на заздалегідь сплановану поверхню [5].

Для нанесення на мідну плиту нікелю, що має більш високу температуру плавлення в порівнянні з міддю, знадобилося використовувати не тільки інші матеріали для інструменту, але і змінити його конструкцію. Кращі результати показують тверді сплави типу кубічного нітриду бору.

Такі інструменти мають підвищену міцність і жароміцність, що дозволяє їх використовувати до температур 1000–1200 °С.

Нанесення проводили на установці для відновлення мідних плит. Для зменшення окислення інструменту в процесі роботи використовувався охолоджуючий обдув його інертним газом (рис. 6). Для зниження викривлення плит при наплавленні нікелю використовували водяне охолодження. На рис. 6 показано процес нанесення шару нікелю на мідну плиту.



Рис. 6. Процес нанесення 3 мм шару нікелю на мідну плиту МБЛЗ методом СТП

Після нанесення нікелю поверхня плити МБЛЗ шліфується.

Висновки

Таким чином, показана можливість зварювання та отримання покриттів на мідь методом ЗТП, розроблено нову технологію, за допомогою якої була відновлена контрольна партія мідних плит МБЛЗ з наступним нанесенням покриття з нікелю та передана на металургійний завод для експлуатації.

M.A. Polecshuk, V.I. Zelenin, A.U. Tunik, L.I. Adeeva, I.M. Popovich

Ye. O. Paton Electric Welding Institute of National Academy of Sciences of Ukraine

APPLICATION OF METHOD OF WELDING BY FRICTION WITH MIXING FOR SURFACING OF COPPER CRYSTALLIZERS

A technology has been developed for surfacing copper molds by the method of friction with stirring (STM), which allows surfacing copper on molds with subsequent application of a wear-resistant metal coating.

The possibility of surfacing nickel on a copper plate by friction with stirring using a tool made of tungsten-bearing materials and cubic boron nitride is shown. The temperatures and forces acting during friction stir surfacing of copper and nickel on copper plates of molds have been determined.

Key words: *surfacing, stirring friction, copper plate, recovery, mold, tool, pin, copper, nickel.*

М.А. Полещук, В.И. Зеленин, А.Ю. Туник, Л.И. Адеева, И.М. Попович

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины

ПРИМЕНЕНИЕ СПОСОБА СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ ДЛЯ НАПЛАВКИ МЕДНЫХ КРИСТАЛЛИЗАТОРОВ

Разработана технология наплавки медных кристаллизаторов способом трения с перемешиванием (НТП), позволяющая наплавлять на кристаллизаторы медь с последующим нанесением износостойкого металлического покрытия.

Показана возможность наплавки никеля на медную плиту методом трения с перемешиванием с использованием инструмента из кубического нитрида бора и твердосплавных вольфрамсодержащих материалов. Определены температуры и усилия, действующие при наплавке меди и никеля трением с перемешиванием на медные плиты кристаллизаторов.

Ключевые слова: *наплавка, трение с перемешиванием, медная плита, восстановление, кристаллизатор, инструмент, пин, медь, никель.*

Література

1. Седерквист Л. Сварка на тысячелетия. // Светсарен–2005. – № 2 – С. 31–32 [in Russian].
2. Масато Т. Кристаллизаторы установок непрерывной разливки стали от «Mashima Kosan» // Междунар. науч.-практ. семинар «Электроплакирование и термическое напыление». – Екатеринбург, 2009. – С. 1–19.
3. Штрикман М. М. Состояние и развитие процесса сварки трением линейных соединений (обзор) // Сварочное производство. – 2007. – № 10 – С. 25–32.
4. Инструменты для наплавки меди трением с перемешиванием / В. И. Зеленин, Н. Г. Третьяк, В. А. Лукаш, и др. // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника, технология его изготовления и применения. Вып. 12. – К.: Изд-во «ЛОГОС», 2009. – С. 464–466.

5. Восстановление плит медных кристаллизаторов непрерывной разливки стали методом наплавки трением с перемешиванием. / В. И. Зеленин, М. А. Полещук, Е. В. Зеленин и др. // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника, технология его изготовления и применения. Вып. 13. – К.: Изд-во «ЛОГОС», 2010. – С. 476–479.

Надійшла 03.08.21

References

1. Sederkvist, L. (2005). Svarka na tysiacheletia [Welding for a millennium]. Svetsaren-2005, 2, 31–32 [in Russian].
2. Масато, Т. (2009). Kristallizatory ustanovok nepreryvnoi razlivki stali ot «Mashima Kosan» [Continuous casting molds from «Mashima Kosan»]. Electroplating and thermal spraying'09: Mezhdunarodnyi nauchno-prakticheskii seminar – International scientific and practical seminar. (pp. 1–19). Екатеринбург [in Russian].
3. Shtrikman, M. M. (2007). Sostoianie i razvitie processa svarki treniem lineinykh soedinenii (obzor) [State and development of the process of friction welding of linear joints (review)]. Svarochnoe proizvodstvo – Welding production, 10, 25–32.
4. Zelenin, V. I., Tretiak, N. G., Lukash, V. A., et al. (2009). Instrumenty dlia naplavki medi treniem s peremeshivaniem [Friction Stirred Copper Cladding Tools] Porodorazrushaiushchii i metalloobrabatyvaiushchii instrument – tekhnika i tekhnologiya ego izgotovleniia i primeneniia – Rock Destruction and Metal-Working Tools – Techniques and Technology of the Tool Production and Applications, 12, 464–466 [in Russian].
5. Zelenin, V. I., Poleshchuk, M. A., Zelenin E. V., et al. (2010). Vosstanovlenie plit mednykh kristallizatorov nepreryvnoi razlivki stali metodom naplavki treniem s peremeshivaniem [Restoration of plates of copper molds for continuous casting of steel by surfacing, friction with stirring]. Porodorazrushaiushchii i metalloobrabatyvaiushchii instrument – tekhnika i tekhnologiya ego izgotovleniia i primeneniia – Rock Destruction and Metal-Working Tools – Techniques and Technology of the Tool Production and Applications, 13, 476–479 [in Russian].

УДК 539.216:621.762

DOI: 10.33839/2708-731X-24-1-430-439

В.В. Івженко, канд. техн. наук, **С. М. Дуб**, д-р техн. наук, **В.М. Ткач**, д-р фіз.-мат. наук,
Т.О. Косенчук

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, вул. Автозаводська, 2,
04074, м. Київ, E-mail: ivv@ism.kiev.ua*

РОЗРОБКА ТЕРМОСТІЙКОГО МАТЕРІАЛУ НА ОСНОВІ НІТРИДУ КРЕМНІЮ З ПІДВИЩЕНОЮ ЗНОСОСТІЙКІСТЮ

Вивчені закономірності спікання під тиском матеріалів з порошкових систем $\text{Si}_3\text{N}_4\text{--Y}_2\text{O}_3\text{--Al}_2\text{O}_3$, $\text{Si}_3\text{N}_4\text{--Y}_2\text{O}_3\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--TiH}_2$. Досліджені особливості формування структури, фазовий склад і властивості отриманих матеріалів. Визначено, що структура матеріалу системи $\text{Si}_3\text{N}_4\text{--Y}_2\text{O}_3\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--TiH}_2$ складається з основної матричної фази і другої фази в вигляді включень, у якій титан, азот і кремній є основними елементами. Показано, що додатково при спіканні проходить значна дифузія до включень ітрію. Встановлено, що при збільшенні вмісту оксиду алюмінію тріщиностійкість матеріалу зменшується з 5,3 до 4,8 МПа·М^{0,5}, а зносостійкість – на ~8%.