

ОЦІНКА ВПЛИВУ ОБЕРТАННЯ ШЛАКОВОЇ ВАННИ НА СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ ШВИДКОРІЗАЛЬНОЇ СТАЛІ

А.В. Нетяга, Ю.М. Кусков, В.А. Костін

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: netyaga_av@ukr.net

Проведено оцінку впливу швидкості обертання шлакової ванни на подрібнення структури металу, наплавлено порошком ПР-10Р6М5 на прикладі електрошлакового наплавлення в струмопідвідному кристалізаторі діаметром 180 мм. Встановлено, що обертання шлакової ванни, яке забезпечується конструкцією струмопідвідного кристалізатора, сприяє подрібненню зерна наплавленої сталі в 1,3...1,5 рази. Показано, що за допомогою програмного забезпечення «MIPAR» можна об'єктивно оцінити зміни, що відбуваються у структурі наплавленого металу під час структурних перетворень при його кристалізації. Бібліогр. 13, рис. 2.

Ключові слова: електрошлакове наплавлення, швидкорізальна сталь, струмопідвідний кристалізатор, обертання шлакової ванни, структура наплавленого металу, величина зерна

Вступ. Вже на самому початку появи та розвитку нових технологій, заснованих на використанні електрошлакового процесу, було встановлено, що електрошлаковий метал за багатьма показниками кращий за литий звичайного виробництва, і навіть у низці випадків його властивості перевищують властивості деформованого металу. Проте було поставлено завдання ще більшого підвищення його якості. Зазвичай це пов'язувалося з бажанням виключити з закристалізованого металу зони транскристалізації та зменшити розміри стовпчастих кристалів. Одним із способів, які пропонувалося використовувати для цих цілей, було застосування в технологічному процесі електромагнітного впливу на рідку металеву ванну [1–5]. Зменшення розмірів зерна сприяло не тільки отриманню однорідної структури, а й підвищенню механічних властивостей металу, особливо пластичних [6].

Тому прогнозування експлуатаційних характеристик металу виробів різного призначення шляхом об'єктивної оцінки його структури, зокрема величини зерна, є важливим завданням у розумінні можливої працездатності обладнання в тих чи інших умовах його експлуатації.

Методика досліджень і матеріали. Метою даної роботи є вибір й апробування металознавчої методики об'єктивної оцінки металу, отриманого при електрошлаковому наплавленні в струмопідвідному кристалізаторі.

У роботі [7] представлені результати досліджень впливу обертального ефекту шлакової ванни з кутовою швидкістю 40...60 об/хв на структуру швидкорізальної сталі, наплавленої в струмопідвідному кристалізаторі діаметром 180 мм. У якості наплавочного матеріалу використовували порошок ПР-10Р6М5, а струмопідвідний кристалізатор (СПК), що забезпечує обертання шлакової ванни, мав можливість завдяки електричному за-

миканню технологічного поздовжнього розрізу в його струмопровідній секції перетворюватися на звичайний кристалізатор, у якому був відсутній ефект електромагнітного обертання ванни. Таким чином, в одному і тому ж пристрої, що формує наплавлений метал, можна було окремо оцінити структурні зміни, які відбуваються під час подачі в шлакову ванну наплавленого порошку з обертанням шлакової ванни і за його відсутності. Іншими словами, такий технологічний підхід дав змогу оцінити вплив процесів інокулювання (кристалізації) спільно з обертанням ванни та лише одного інокулювання на зміну параметрів мікроструктури (розмір зерен, об'ємну частку фаз, однорідність розподілу та інше) наплавленого металу, тим самим визначивши частку обертального руху у формуванні структури, що отримується.

Слід уточнити використовуване нами поняття — обертання шлакової ванни. Цей показник під час наплавлення металу фіксується візуально, проте обертання шлакової ванни через сили в'язкого тертя призводить до обертання металеві ванни. Саме цей рух і надає в кінцевому підсумку вплив на структуроутворення наплавленого металу. За наявними уявленнями його пояснюють або виходячи зі змін теплового стану в процесі кристалізації [8], або теплового і механічного впливу на тверді кристали, що виникають у рідкому металі (зламування їх і поява нових зародків зростання) [9, 10]. Існує й особливий погляд на зміну умов кристалізації під впливом магнітного поля, що забезпечує обертальний ефект у струмопідвідному кристалізаторі [10]. Не виключений і вплив на процес кристалізації виникнення в рідкому металі й інших потоків, як це має місце під час електрошлакового переплаву [11, 12]. Але наявність

А.В. Нетяга — <https://orcid.org/0000-0002-0576-8006>, Ю.М. Кусков — <https://orcid.org/0000-0002-8091-2274>,

В.А. Костін — <https://orcid.org/0000-0002-2677-4667>

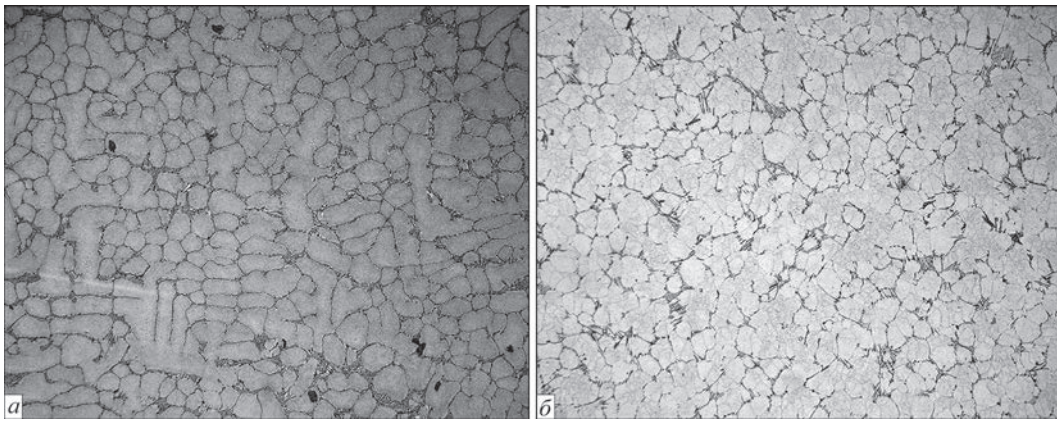


Рис. 1. Мікроструктура металу зразків, отриманих методом оптичної металографії (×100): *a* — метал, що закристалізувався без обертання шлакової ванни; *б* — метал, що закристалізувався в умовах обертання шлакової ванни

цих явищ потребує додаткового спеціального дослідження. Наявність же оберального ефекту було підтверджено експериментально [13].

У результаті проведених металографічних досліджень було встановлено відмінності в структурі наплавленої швидкорізальної сталі в разі її кристалізації під час обертання шлакової ванни: подрібнення структури; різнозернистість — ко-

мірки мають розмір від 30 до 120 мкм, проте середній діаметр становить приблизно 45...50 мкм (без обертання ванни — 80...90 мкм); утворення тонких меж субзерен, які декоровані дрібними карбідними включеннями; більші точкові карбіди в тілі осередків; макротвердість становить у середньому 57 HRC і більш рівномірно розподілена за поперечним перерізом наплавленого зразка.

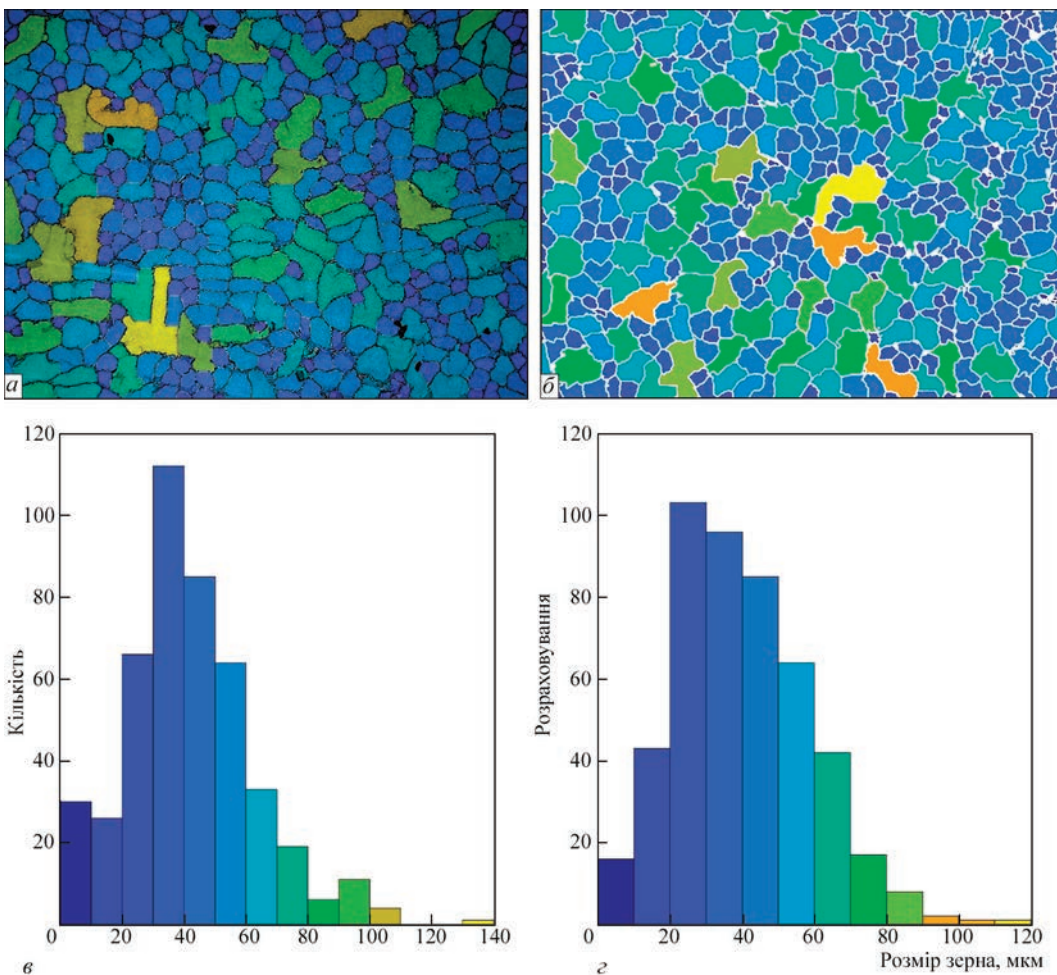


Рис. 2. Дослідження мікроструктури металу (×100) за допомогою програмного забезпечення «MIPAR»: *a* — мікроструктура металу зразка, що закристалізувався без обертання шлакової ванни; *б* — мікроструктура металу зразка, що закристалізувався в умовах обертання шлакової ванни; *в* — гістограма розподілу розміру зерна без обертання шлакової ванни; *г* — гістограма розподілу розміру зерна в умовах обертання шлакової ванни

Незважаючи на те, що завдяки обертанню шлакової ванни вдається отримати метал із дрібнішою структурою порівняно з металом, наплавленим без обертання ванни, різнозернистість структури, що має місце, ускладнює візуальну (за допомогою мікрофотографій) їх ідентифікацію та підтвердження статистичних даних вимірювань.

На жаль перед сучасними дослідниками стоїть непросте завдання опрацювати недосконалі мікрофотографії, для чого потрібен гнучкий набір інструментів. Для вирішення цієї проблеми зараз використовується відповідне програмне забезпечення — програма аналізу зображень. У роботі було використано програмний комплекс «MIPAR» (<http://mipar.us/>). Аналіз зображень за допомогою програмного комплексу «MIPAR» поєднує в собі індивідуальні алгоритми та потужні системи глибокого навчання для створення технологій, здатних виконувати складні дослідження мікроструктур: виділяти та аналізувати окремі фрагменти структур зерна, фази, дрібні неметалеві включення, розраховувати їх частку і розмір, орієнтацію та інші геометричні параметри.

Програмний комплекс «MIPAR» дозволяє проводити аналіз зображень, здатних ідентифікувати і вимірювати характеристики практично будь-якого зображення, яке можна захопити за допомогою цифрових оптичних фотокамер та електронних мікроскопів. Завдяки п'яти інтегрованим програмам «MIPAR» (Image Processor, Batch Processor, Real-Time Processor, Post Processor, 3D Toolbox) пропонує потужне та ефективне середовище для вирішення різних завдань, що виконуються при аналізі 2D та 3D зображень. MIPAR пропонує робочі процедури, які добре підходять для вирішення різних завдань металографічного аналізу зображень.

У програмі «MIPAR» використовується технологія глибокого навчання штучного інтелекту (ШІ), яка дозволяє навчити програмне забезпечення адаптуватися до мікрофотографій, які характеризуються різним контрастом, яскравістю та особливостями текстури, а також способом виявлення мікроструктури на підготовлених зразках.

В останніх версіях програми «MIPAR» використовується велика бібліотека процедур (recipe) для визначення розмірів зерен, об'ємної частки та розподілу за розмірами фаз і включень, визначення орієнтації та неоднорідності структури, особливостей текстури для різних металів та сплавів (сталей, алюмінієвих та титанових сплавів та ін.).

Саме програмний комплекс «MIPAR» був залучений для експериментального визначення параметрів зерен наплавленого металу.

Об'єктами дослідження слугував метал зразків, що кристалізувався поблизу формувальної стінки

кристалізатора. На рис. 1 представлені мікрофотографії зразків, отриманих методом оптичної металографії, а на рис. 2 — той самий метал, досліджений за допомогою програмного забезпечення «MIPAR». Як видно з гістограми розподілу розміру зерен у металі, отриманому з обертанням шлакової ванни і за його відсутності (рис. 2, в, з), перший кристалізується з формуванням структурних осередків з розмірами, меншими приблизно в 1,3...1,5 раза.

Так аналіз отриманих результатів показав, що середній розмір зерен металу наплавки без обертання шлакової ванни становить 35...40 мкм (рис. 2, в), тоді як середній розмір зерен в умовах обертання шлакової ванни становить 18...20 мкм. Суттєво відрізняється і характер розподілу зерен за розмірами. В наплавленому металі, отриманому без обертання шлакової ванни, формується більше великих зерен (тобто частка зерен більше 40 мкм становить більше 60 %), тоді як у наплавленому металі, отриманому в умовах обертання шлакової ванни, навпаки формується більше дрібних зерен.

Таким чином, експериментально підтверджено вплив обертання шлакової ванни на формування мікроструктури наплавленого металу, яке при відповідних умовах може забезпечити отримання дрібнозернистої структури з рівнем твердості наплавленого металу на рівні 57...60 HRC з використанням порошку швидкорізальної сталі 10P6M5.

Висновки

1. Шляхом металографічних досліджень металу, наплавленого в ТПК порошком швидкорізальної сталі 10P6M5, встановлено, що обертання шлакової (і металеві) ванни є додатковим фактором подрібнення структури сталі так само, як інокулювання.

2. Застосування при металографічних дослідженнях наплавленого металу програмного забезпечення «MIPAR» дає змогу об'єктивно експериментально визначити параметри зерен в умовах складного структурно-фазового стану та оцінити характер впливу зовнішніх факторів на структурні зміни під час кристалізації наплавленого металу.

3. За допомогою програмного забезпечення «MIPAR» встановлено, що відносно невелике обертання шлакової ванни (<60 об/хв) сприяє подрібненню зерен швидкорізальної сталі в 1,3...1,5 рази.

Список літератури

1. Лагаш Ю.В., Медовар Б.И. (1970) *Електрошлаковий переплав*. Москва, Металлургия.
2. Трочук И.П., Черныш В.П. (1965) Магнитное управление кристаллизацией при электрошлаковом процессе. *Сварочное производство*, **11**, 15–19.
3. Кусков Ю.М., Рябцев И.А., Кузьменко О.Г., Лентюгов И.П. (2020) *Електрошлаковий технології наплавки і рециклінга металургічних і металосодержащих отходов*. Киев, Інтерсервіс.

4. Билоник И.М., Попов С.Н., Шумикин С.А. и др. (2019) Анализ способов повышения эффективности электрошлакового процесса путем изменения тепловых условий плавления расходоуемого электрода. *Металлургия. Запоріжжя, ЗНУ*, Вип. 1, 23–29. DOI: <https://doi.org/10.26661/2071-3789-2019-1-41-04>
5. Радченко А.А. (2000) Влияние внешних электромагнитных воздействий на технологию электрошлаковой наплавки покрытий и их свойства. *Сб. тр. науч.-техн. конф. «Сварочные конструкции», Киев, октябрь, 2000 г., Киев, ИЭС им. Е.О. Патона*, сс. 115–116.
6. Армстронг Р.В. (1973) Прочностные свойства металлов со сверхмелким зерном. *Сверхмелкое зерно в металлах*. Москва, Металлургия, сс. 41–82.
7. Netyaga A.V., Kuskov Yu.M., Biktagirov F.K. et al. (2022) Effect of slag pool rotation on the structure of a high-speed steel in current — Supplying mold. *Steel in Translation*, 52(6), 598–601. DOI: <http://dx.doi.org/10.3103/S0967091222060109>
8. Видов С.В., Вишкарев А.Ф., Зверев Б.Ф. и др. (1993) Воздействие слабых магнитных полей на процесс кристаллизации металла. *Сталь*, 1, 18–22.
9. Протокивиллов И.В. (2011) Измельчение кристаллической структуры полых титановых слитков при магнитоуправляемой электрошлаковой плавке. *Современ. электрометаллургия*, 4, 3–5.
10. Нетьяга А.В., Кусков Ю.М. (2021) Особливості кристалізації металеві ванни під час електрошлакового наплавлення в струмопідвідному кристалізаторі. *Металлургія, Запоріжжя, ЗНУ*, вип. 2, 30–34. DOI: <https://doi.org/10.26661/2071-3789-2021-2-04>
11. Компан Я.Ю., Назарчук А.Т., Протокивиллов И.В., Петров Д.А. (2012) Возможности использования импульсных электромагнитных воздействий в электрошлаковых процессах. *Современ. электрометаллургия*, 2, 8–13.
12. Миронов Ю.М. (2018) *Установки электрошлаковой металлургической технологии*. Москва, ИНФРА-М.
13. Кусков Ю.М., Соловьев В.Г. (2018) Экспериментальное изучение вращения шлаковой и металлической ванн при электрошлаковом процессе в токоподводящем кристаллизаторе. *Автоматическая сварка*, 7, 41–44. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/as2018.07.07>
2. Trochun, I.P., Cherny, V.P. (1965) Magnetic control of crystallization at electroslag process. *Svarochn. Proizvodstvo*, 11, 15–19 [in Russian].
3. Kuskov, Yu.M., Ryabtsev, I.A., Kuzmenko, O.G., Lentyugov, I.P. (2020) *Electroslag technologies of cladding and recycling of metal and metal-containing waste*. Kyiv, Interservice.
4. Bilonik, I.M., Popov, S.N., Shumikin, S.A. et al. (2019) Analysis of the ways to increase the efficiency of the electroslag process by changing the thermal conditions of the consumable electrode melting. *Zaporizhzhia, Zbirnyk ZNU*, 1, 23–29. DOI: <https://doi.org/10.26661/2071-3789-2019-1-41-04>
5. Radchenko, A.A. (2000) Influence of external electromagnetic effects on the technology of electroslag cladding of coatings and their properties. *Abstracts of Pap. of Intern. Conf. on Welding Structures*, Kyiv, October, 2000. Kyiv, PWI, 115–116.
6. Armstrong, R.V. (1973) Strength properties of metals with superfine grain. In: *Superfine Grain in Metals*. Moscow, Metallurgiya, 41–82.
7. Netyaga A.V., Kuskov Yu.M., Biktagirov F.K. et al. (2022) Effect of slag pool rotation on the structure of a high-speed steel in current — Supplying mold. *Steel in Translation*, 52(6), 598–601. DOI: <http://dx.doi.org/10.3103/S0967091222060109>
8. Vidov, S.V., Vishkarev, A.F., Zverev, B.F. et al. (1993) Effect of weak magnetic fields on the process of metal crystallization. *Stal*, 1, 18–22 [in Russian].
9. Protokovilov, I.V. (2011) About feasibility of refining crystalline structure of hollow ingots of titanium alloys in magnetically-controlled electroslag melting. *Sovrem. Elektrometall.*, 4, 3–5.
10. Netyaga, A.V., Kuskov, Yu.M. (2021) Features of crystallization of a metal bath during electroslag surfacing in a current-supply crystallizer. *Zaporizhzhia, Vestnik ZNU*, 2021, Issue 2, 30–34. DOI: <https://doi.org/10.26661/2071-3789-2021-2-04>
11. Kompan, Ya.Yu., Nazarchuk, A.T., Protokovilov, I.V., Petrov, D.A. (2012) Possibilities of using pulsed electromagnetic effects in electroslag processes. *Sovrem. Elektrometall.*, 2, 8–13.
12. Mironov, Yu.M. (2018) Installations of electroslag metallurgical technology. Moscow, INFRA-M.
13. Kuskov, Yu.M., Soloviev, V.G. (2018) Experimental study of slag and metal bath rotation during electroslag process in the current-feeding crystallizer. *Avtomatychne Zvaryuvannya*, 7, 41–44. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/as2018.07.07>

References

1. Latash, Yu.V., Medovar, B.I. (1970) *Electroslag remelting*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].

EVALUATION OF THE EFFECT OF SLAG BATH ROTATION ON THE STRUCTURE FORMATION OF HIGH-SPEED STEEL

A.V. Netyaga, Yu.M. Kuskov, V.A. Kostin

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: netyaga_av@ukr.net

The influence of the slag bath rotation speed on refining of the structure of metal deposited with PR-10R6M5 powder was evaluated by example of electroslag surfacing in Ø 180 mm current-carrying mould. It is established that rotation of the slag bath, provided by the design of the current-carrying mould, contributes to the refinement of the deposited steel grain by 1.3...1.5 times. It is shown that the MIPAR software can be used to objectively assess the changes that occur in the structure of the deposited metal during structural transformations during its crystallization. 13 Ref., 2 Fig.

Keywords: electroslag surfacing, high-speed steel, current-carrying mould, slag bath rotation, structure of deposited metal, grain size

Отримано 15.10.2024

Отримано у перегляданому вигляді 20.11.2024

Прийнято 25.02.2025