

Нетяга Антон Володимирович, інженер, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ
Кусков Юрій Михайлович, начальник відділу, доктор технічних наук, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ

ОСОБЛИВОСТІ КРИСТАЛІЗАЦІЇ МЕТАЛЕВОЇ ВАННИ ПІД ЧАС ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ В СТРУМОПІДВОДНОМУ КРИСТАЛІЗАТОРІ

Відмічено можливість одержання дрібнозернистого наплавленого металу під час електрошлакового наплавлення в струмопідводному кристалізаторі. Виконано аналіз впливу електромагнітної дії на кристалізацію рідкого металу в споріднених технологіях зварювання, наплавлення та переплавки, а також безперервного розливання сталі. Встановлена відсутність єдиної думки про механізм кристалізації металу в таких умовах. На підставі вивчення істотних гіпотез запропоновано механізм підвищення дискретності металу, наплавленого в струмопідводному кристалізаторі таким, що об'єднує як теплофізичний компонент кристалізації, так і магнітну субстанцію, як самостійний елемент дії.

Ключові слова: електрошлакове наплавлення, струмопідводний кристалізатор, металева ванна, кристалізація рідкого металу, електромагнітна дія

Г.В. Ксендик, розробник ідеї та базової конструкції струмопідводного кристалізатора (СПК), надавав велике значення спроможності кристалізатора забезпечувати обертання шлакової ванни в горизонтальній площині. Одна з його статей так і має назву «Струмопідводний кристалізатор, що забезпечує обертання шлакової ванни» [1].

Надалі питанням обертання шлакової та металевої ванн в СПК було надано особливу увагу. Виконано оцінку можливості його виникнення під час електрошлакового наплавлення не лише на змінному струмі промислової частоти, але і за його зниженій частоті, а також у разі використання постійного струму [2].

Експериментально було підтверджено визначальний вплив робочого струму наплавлення на виникнення обертального ефекту в шлаковій ванні [3].

Зазвичай як позитивний вплив магнітного обертання в СПК розглядаються послаблення руйнівної дії мікродуг (електроерозія) на межі шлак – стінка кристалізатора, досягнення вирівнювання температури та фізико-хімічних властивостей шлакової ванни, одержання рівномірного розподілу дробу (у разі застосування дискретної наплавлювальної присадки) за периметром кристалізатора. Окрім того, встановлено, що обертання шлакової ванни сприяє прискоренню процесів теплообміну між шлаком і дробом, а також збільшенню відносної маси шлаку, який взаємодіє з нею, внаслідок чого інтенсифікуються процеси рафінування наплавленого металу. У разі кільцевого електрошлакового наплавлення (ЕШН) обертання шлакової ванни в горизонтальній площині до певної міри зменшує коливання проплавлення за периметром заготовки [4].

Таким чином, під час ЕШН у струмопідводному кристалізаторі електромагнітна дія на шлакову та металеву ванни, в основному, розглядається як технічний прийом, що забезпечує стабільність електрошлакового процесу та досягнення якісного з'єднання головного і наплавленого металів. Вплив такого типу зовнішньої дії на метал, що кристалізується, під час ЕШН у СПК практично не вивчався.

Метою роботи є оцінка впливу електромагнітного обертання шлакової (металевої) ванни на структуроутворення наплавленого металу та, найголовніше, запропонувати пояснення причин цього впливу.

Одна з перших спроб дослідження впливу обертання шлакової ванни на кристалізацію наплавленого металу в СПК була викладена в роботі [5]. Показаний загальний характер змінювання макроструктури наплавленого металу залежно від швидкості обертання шлакової ванни без якісної оцінки з точки зору вибору оптимальної швидкості обертання ванни, що забезпечує одержання металу з дрібнозернистою структурою. При цьому швидкість обертання змінювали від 20...25 об./хв до 72 об./хв.

Оптимізацію величини кутової швидкості обертання для одержання металу з більш дискретною структурою таї рівномірним її розподілом щодо поперечного перерізу наплавленого шару розглянуто в роботах [6; 7].

Було встановлено, що для різних типів чавунів оптимальна швидкість обертання може дещо відрізнятись. Так, під час наплавлення нелегованого чавуну навіть невеликі кутові швидкості (40...50 об./хв) дає змогу одержувати більш дисперсну структуру сплаву з приблизно однаковою мікротвердістю структурних складових за перерізу шару в порівнянні з ЕШН без обертання ванни [6]. Для підвищення дисперсності наплавленого високохромистого чавуну бажано використовувати вищі швидкості обертання – до 70...100 об./хв [7].

Для розуміння причин такого впливу обертання шлакової ванни на процеси структуроутворення наплавленого металу слід розглянути результати досліджень щодо магнітного управління кристалізацією рідкого металу в споріднених електрошлакових технологіях (ЕШЗ, ЕШН, ЕШП) і технологіях литва, що використовують для формування металу водоохолоджувані пристрої – кристалізатори (безперервне розливання сталі).

У одній з перших робіт, присвячених перемішуванню шлакової та металеві ванн за електрошлаковим процесом з примусовим електромагнітним обертанням [8], було відзначено, що за певних умов спостерігається невелике подрібнення стовпчастих кристалітів, без пояснення причин такого явища.

У експериментах, виконаних приблизно у ті ж роки, на заводі «Електросталь» [9], навпаки, стверджувалося, що за накладенням постійного магнітного поля від окремого джерела постійного струму ніяких змінювань у величині зерна електрошлакового металу не спостерігали. Хоча трохи пізніше ті ж дослідники одержали інші результати [10]. При цьому подрібнення структури вони пояснювали рухом розплаву, який скорочує час зародження центрів кристалізації та впливає на швидкість зростання кристалітів. Автори також вважають, що не можна недооцінювати вплив на подрібнення структури та нових центрів кристалізації, кристалітів, що утворюються в результаті ломання, під час руху металу у ванні.

За даними І.П. Трочуна і В.П. Черниша [11] найкращі результати з точки зору подрібнення структури в процесі ЕШП виходять під час коливального характеру руху металеві ванни. Найбільш вірогідним є механізм подрібнення, за їх уявленнями, пов'язаний з кавітацією.

Цікаві матеріали представлені у роботі [12] щодо переплавлення на змінному струмі із зовнішнім постійним магнітним полем, різного типу матеріалів. Металографічні дослідження показали, що застосування магнітного поля призвели до подрібнення та зменшення негомogeneousності та первинної структури металу зливка. При цьому дисперсність структури та її однорідність зростають у міру збільшення магнітної індукції. Фізичний сенс цих змінювань не показаний.

Як видно з аналізу, відносно невеликої кількості способів дії електромагнітних полів на кристалізацію рідкого металу, в більшості випадків пропонується тільки констатація факту – відбувається подрібнення структури металу. Якщо виключити з розгляду імпульсні та реверсивні способи накладення магнітних полів (що відповідає ЕШН

в СПК), коли на кристалізацію рідкого металу можуть впливати як механізми гідравлічної, так і теплової дії, то головним чинником подрібнення слід визнати ломання зростаючих кристалітів під час руху всього об'єму рідкого металу, або його окремих шарів відносно зростаючих у ній кристалітів.

Враховуючи те, що під час ЕШН в СПК за діаметрів кристалізатора приблизно до 150...200 мм кутова швидкість обертання шлакової ванни в більшості випадків не перевищує 40...60 об./хв важко представити в цих умовах активне ломання кристалітів і формування на підставах уламків, що утворюються, нових центрів кристалізації.

Цікавішим представляється погляд на процес кристалізації безперервно відливаного зливка під впливом слабких магнітних полів [13]. Застосування таких полів, мабуть, найбільш відповідає умовам виконання ЕШН у СПК. При цьому автори виходять з наступних міркувань, стан металу перед фронтом твердіння значно впливає на процес кристалізації та структуру литого металу. У зв'язку з переохолодженням розплаву перед фронтом кристалізації будова твердої фази поширюється і в рідину, що є безпосередньо прилеглою до твердої фази. Шар розплаву перед фронтом твердіння певної товщини називається областю «структурної дифузії». Слабкі магнітні поля, хоча і не спричинюють перемішування розплаву, проте помітно впливають на параметри процесу кристалізації. Це, мабуть, пов'язано із змінюванням за впливом магнітного поля параметрів області «структурної дифузії». Область можна представити як двофазну, таку, що містить кристалічні зародки із структурою твердої фази поблизу температури твердіння. У двофазній зоні існує тільки один шар зародків. У зв'язку з цим вплив магнітного поля на область «структурної дифузії» можна представити як вплив на зародки двофазної зони, які є парамагнітними. На парамагнітний зародок, поміщений в поле соленоїда, діє сила, що примушує його перемішатися. Із збільшенням швидкості видалення зародка з двофазної зони, зменшується протяжність області «структурної дифузії» та, отже, знижується швидкість зростання зародків.

Існує і простіше пояснення процесів подрібнення структури металу під впливом електромагнітного поля [14]. Автори, само магнітне поле оцінюють інакше, ніж зазвичай. Загальноприйняте магнітне поле в електромагнітних технологіях розглядати як середовище, необхідне для збудження сил в розплаві. Але їх багаторічний досвід роботи дає змогу розглядати магнітне поле як субстанцію, що активно впливає на процес кристалізації сплавів. Зокрема, в сплаві відбувається зниження температури початку процесу первинної кристалізації та їх прискорення з явно вираженою рейфлексенцією, що в сукупності свідчить про змінювання теплофізичних умов кристалізації розплаву за дією магнітного поля.

Висновки.

1. До теперішнього часу немає єдиної думки про механізм формування структури металу за умов дії магнітних полів.

2. Незважаючи на наявність відносно слабких магнітних полів, що виникають під час ЕШН у СПК, вдається досягати значного подрібнення структури наплавленого металу.

3. На підставі аналізу існуючих механізмів кристалізації рідкого металу в умовах електромагнітної дії для металу, що формується під час ЕШН у СПК, можна запропонувати механізм, що об'єднує як теплофізичний компонент кристалізації, так і магнітну субстанцію, як самостійний елемент дії.

Бібліографічний перелік

1. Ксендзык Г. В. Токоподводящий кристаллизатор, обеспечивающий вращение шлаковой ванны. *Специальная электрометаллургия*. 1975. Вып. 27. С. 32–40.

2. Томиленко С.В., Кусков Ю.М. Применение постоянного тока и переменного пониженной частоты при наплавке в секционных токоподводящих кристаллизаторах. *Сварочное производство*. 2002. № 2. С. 22–24.
3. Кусков Ю.М., Соловьев В.Г. Экспериментальное изучение вращения шлаковой и металлической ванн при электрошлаковом процессе в токоподводящем кристаллизаторе. *Автоматическая сварка*. 2018. № 7. С. 41–44.
4. Кусков Ю.М., Скороходов В.Н., Рябцев И.А., Сарычев И.С. Электрошлаковая наплавка. Москва : Наука технологии, 2001. 180 с.
5. Томиленко С.В., Кусков Ю.М., Ус В.И. Устройство электромагнитного перемешивания для токоподводящих кристаллизаторов, обеспечивающее регулируемое вращение шлаковой ванны. *Проблемы специальной электрометаллургии*. 1993. № 3. С. 16–18.
6. Кусков Ю.М., Богайчук И.Л., Фесенко М.А. О возможности передачи при электрошлаковой наплавке параметров структуры в системе дискретный наплавочный материал – наплавочный металл. *Электрометаллургия*. 2021. № 4. С. 30–37.
7. Кусков Ю.М., Богайчук И.Л., Фесенко М.А. Влияние размера наплавочной дроби и технологических параметров электрошлаковой наплавки на структурообразование наплавленного высокохромистого чугуна. *Электрометаллургия*. 2021. № 7. С. 12–18.
8. Дудко Д.А., Рублевский И.Н. Электромагнитное перемешивание шлаковой и металлической ванн при электрошлаковом процессе. *Автоматическая сварка*. 1960. № 9. С. 12–16.
9. Дружинина Н.П., Клюев М.М., Розанов Д.П., Топилин В.В. Электромагнитное вращение жидкой ванны при электрошлаковом переплаве. *Черная металлургия* : бюллетень НТИ. 1963. № 3. С. 38–40.
10. Топилин В.В., Клюев М.М., Фомичева Н.П., Гребцов Ю.Г. Измельчение макроструктуры слитков при электрошлаковом переплаве сплавов. *Специальная. электрометаллургия*. 1968. № 1. С. 23–28.
11. Трочун И.П., Черныш В.П. Магнитное управление кристаллизацией при электрошлаковом процессе. *Сварочное производство*. 1965. № 11. С. 3–5.
12. Муграш М., Чаус А.С. Использование магнитного поля при электрошлаковом переплаве стали. *Физика и химия обработки материалов*. 1998. № 2. С. 99–107.
13. Видов С.В., Вишнарев А.Ф., Зверев Б.Ф. Воздействие слабых магнитных полей на процесс кристаллизации металла. *Сталь*. 1993. № 11. С. 18–22.
14. Муграш М., Чаус А.С., Покусова М. Непрерывное литье стальных заготовок с перемешиванием расплава в кристаллизаторе и слитке. *Физика и химия обработки материалов*. 1999. № 5. С. 96–103.

References

1. Ksendzyk G.V. Tokopododyacshy kristallizator, obespechiayucshi vracshenie shlakovoi vannы. *Spetsialnata rlrktrometallurgya*. 1975. Is. 27. S. 32–40.
2. Tomilenko S.V., Kuskov Yu.M. Primenenie postoyannogo toka i peremennogo ponizheniya chatoty pri naplavke v sektsonnykh tokopodvodyacsh kristallizatorakh. *Svarochnoe proivodstvo*. 2002. No. 2. P. 22–24.
3. Kuskov Yu.M., Solovev V.G. Eksperimentalnoe izuchenie vracsheniya shlakovoy i metallicheskoy vann pri elektroshlakovom protsesse v tokopodvodyacshem kristallizatore. *Atomaticheskaya svarka*. 2018. No 7. S. 41–44.
4. Kuskov Yu.M., Skorokhodov V.N., Ryabtsev I.A., Sarychev I.S. Elektroshlakovaya naplavka. Moskva : Nauka tekhnologii, 2001. 180 s.
5. Tomilenko S.V., Kuskov Yu.M., Us V.I. Ustrojstvo elektromagitnogo peremeshivaniya dlya tokopodvodyacshikh ktistalizatorakh, obespechivayucshee reguliruемое vrashenie shlakovoy vannы. *Problemy spetsalnoy rlrktrometallurgii*. 1993. No. 3. S. 16–18.
6. Kuskov Yu.M., Bogajchuk I.L., Fesenko M.A. O vozmozhnosti peredachi pri elektroshlakoi naplake parametrov struktury v sisteme diskretnyi naplavochnyi material – naplavochnyi metall. *Tlektomeyallurgya*. 2021. No. 4. S. 30–37.
7. Kuskov Yu.M., Bogajchuk I.L., Fesenko M.A. Vliyanie razmera naplavochnoi drobi i tekhnologicheskikh parametrov elektroshlakovoi naplavki na strukturoobrazovanie naplavlennogo vysokokhromistogo chuguna. *Elektrometallyrgiya*. 2021. No. 7. S. 12–18.
8. Dudko D.A., Rublevski I.N. Elektromagitnoe peremeshivanie shlakovoi i mrtallichesoi vann pri elektroshlakovom protsesse. *Avtomaticheskaya svarka*. 1960. No. 9. S. 12–16.

9. Druzhinina N.P., Klyuev M.M., Rozanov D.P., Topilin V.V. Elektromagnitnoe vraschenie zhidkoi vanny pri rektroshlakovvom pereplave. *Chernaya metallurgiya* : byuleten NTI 1963. No. 3. S. 38–40.
10. Topilin V.V., Klyuev M.M., Fomicheva N.P., Grebtsov Yu.G. Izmelchenie makrostruktury slitkov pri elektroshtakovom peteplave splavov. *Spetsilnaya elektrometallurgiya*. 1968. No. 1. S. 23–28.
11. Trochun I.P., Chernysh V.P. Magnitnoe upravlenie kristallizatsiej pri elektroshtakovom protsesse. *Svarochnoe proizvodstvo*. 1965. No. 11. S. 3–5.
12. Mutrash M., Chaus A.S. Ispolzovanie magnitnogo polya pri elektroshtakovom pereplave stali. *Fizika i chimiya obrabotki materialov*. 1998. No. 2. S. 99–107.
13. Vidov S.V., Vishnarev A.F., Zverev B.F. Vozdejstvie slabykh magnitnykh polej na protsess krstallzatsii metalla. *Stal*. 1993. No. 11. S. 18–22.
14. Mugrash M., Chaus A.S., Pokusova M. Nepreryvnoe lite stalnykh Hzagotovok s peremeshivaniem rasplava v kristallizapore i slitke. *Fizika i chimiya obrabotki materialov*. 1999. No 5. S. 96–103.

Netyaga Anton, Engineer, Institute of Electric Welding after E.O. Paton NASU

Kuskov Yuri, Department Head, Doctor of Technical Sciences. Institute of Electric Welding after E.O. Paton NASU

FEATURES OF CRYSTALLIZATION FOR METALLIC BATH DURING ELECRTOSLAG BUILDING-UP IN CURRENT-CARRYING CRYSTALLIZER

There is noted possibility of fine-grained built-up metal receipt during electro-slag building-up in current-carrying crystallizer. The analysis of influence of the electromagnetic action on crystallization of liquid metal in congenial technologies of welding, building-up and meltback, and also continuous pouring of steel is executed. There is set vacuity of only mind about the mechanism of crystallization of metal in such conditions. On the base of substantial hypotheses study the mechanism of increase for metal discreteness, built-up in current-carrying crystallizer such, which united both the thermophysical component of crystallization and magnetic substance as an independent element of action is offered.

Keywords: electro-slag building, current-carrying crystallizer, metallic bath, crystallization of liquid metal, electromagnetic action

Стаття надійшла 02.11.01 р.