

**Шаповалов В.О.¹, Барабаш В.В.¹, Біктагіров Ф.К.¹, Протоковілов І.В.¹,
Гнатушенко О.В.¹, Ігнатов А.П.¹, Злигорєв К.В.²**

(¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, м. Київ; ²ПрАТ «НКМЗ», м. Краматорськ)

ВПЛИВ ЗОВНІШНІХ ЧИННИКІВ НА ФОРМУВАННЯ СТАЛЕВИХ ЗЛИВКІВ

E-mail: barabash.vv@ukr.net

Питаннями формування сталевих зливків та його якості займалися та продовжують займатися в багатьох країнах із розвиненою металургійною промисловістю. Завдяки фундаментальним дослідженням у цій галузі визначено багато технологічних параметрів їх отримання, що дозволяють уникнути грубих дефектів поверхні та внутрішньої будови. Однак підвищення вимог до надійності та довговічності виробів, що виготовляються зі зливків, викликає необхідність постійного підвищення якості останніх. Особливо це стосується виробництва великих ковальських та плоских зливків масою сотні тонн.

Традиційні методи, пов'язані з оптимізацією хімічного складу металу, удосконаленням способів та технологій розливання та заповнення рідким металом виливниць, зміною їх геометричних параметрів, поліпшенням умов роботи прибутку практично вичерпали себе. Подальші кроки в напрямку істотного підвищення якості великих зливків полягають у застосуванні спеціальних методів їх отримання. Багато з них пов'язані з електрошлаковими технологіями, таких як ЕШП, ЕШВ, ПЕШО, BEST та TREST процеси [1, 2]. Однак позитивний вплив таких методів знижується зі збільшенням маси зливків, а їх використання, особливо ЕШП, значно збільшує собівартість металопродукції.

Відомо, що одним з методів, спрямованих на поліпшення умов формування сталевих зливків, є перемішування рідкої серцевини. Такий прийом отримав широке розповсюдження при безперервному розливанні шляхом встановлення зовнішніх джерел магнітного поля, під впливом яких відбувається рух рідкого металу. Однак для великих зливків, що розливаються у виливниці, перетин яких досягає 2...3 м, для електромагнітного перемішування потрібно створення пристроїв великої потужності та великих габаритів. Також складним для подібних

зливків є застосування таких способів як вібрація виливниці або накладання ультразвукових коливань. Тому видається, що перспективними можуть бути лише механізми зовнішнього впливу на рідку серцевину зливків, що твердіють, шляхом введення в неї перемішуючих пристроїв, які спонукають рух розплаву.

Занурення будь-яких пристроїв всередину зливка, вимагає збереження дзеркала металу тривалий час у рідкому стані. Враховуючи, що час кристалізації великих зливків досягає кількох десятків годин, для використання подібних пристроїв необхідний підігрів дзеркала металу у прибутку. Таким чином, ефективним способом впливу на умови формування сталевих зливків може бути поєднання обігріву прибутку і перемішування рідкого металу шляхом введення пристрою, що перемішує середину зливка під час його затвердіння.

Перевірка даного твердження із отриманням реальних великих зливків пов'язана зі значними матеріальними затратами. Тому альтернативою цього є широке застосування методів математичного і фізичного моделювання. При цьому фізичне моделювання з використанням прозорих моделей наочно відображає особливості переходу металу з рідкого стану у твердий. Зважаючи на це на фізичних моделях було проведено дослідження впливу підігріву та перемішування розплаву на процес формування зливка.

Об'єктом моделювання було обрано зливков масою 205 тонн. Конструктивно модель являє собою металевий каркас габарити якого є подібними до осьового перерізу зливка у співвідношенні 1:10. На каркасі з оргскла закріплені передня та задня стінки. У верхній частині моделі встановлені теплоізолюючі прокладки, що імітують такі ж вкладиші у прибутковій частині зливка, а також електричний нагрівач для моделювання підігріву дзеркала металу. У якості моделюючого середовища було обрано гіпосульфат натрію, що широко застосовується для фізичного моделювання кристалізації сталевих зливків [3, 4]. Важливою характеристикою цього матеріалу є те, що він кристалізується за дендритним механізмом і його теплофізичні властивості забезпечують подібність процесів кристалізації металу. При цьому, гіпосульфат натрію в рідкому вигляді зберігає оптичну прозорість, що дозволяє спостерігати і фіксувати в динаміці процес

просування та зростання твердої фази, а також зміну розмірів і форми частини зливка, що не затверділа.

Процес моделювання здійснювався за трьома варіантами:

- без підігріву головної частини зливка;
- із підігрівом дзеркала гіпосульфїту натрію;
- із підігрівом та періодичним перемішуванням.

В експериментах, що проводилися за першим варіантом, після заповнення моделі рідиною зверху її накривали теплоізолюючою кришкою, що імітує утеплення прибуткової частини зливка. В експериментах за другим варіантом верхню частину зливку підігрівали за допомогою спірального нагрівача для забезпечення температури гіпосульфїту натрію вищете температури його плавлення з поступовим зниженням інтенсивності нагріву. У третьому варіанті, окрім підігріву, рідину періодично перемішували з метою вирівнювання температури у верхній і середній частинах моделі. Фіксація процесу затвердіння проводилася за допомогою фото- та відеозйомки.

Згідно з результатами моделювання, наведеними на рис. 1-3, за відсутності зовнішнього впливу вздовж осі зливка під прибутком утворюється закрита усадкова порожнина на відстані приблизно $3/4$ його висоти. Підігрів прибуткової частини дозволив уникнути утворення усадкових порожнин, проте приблизно в тій же області мали місце розосереджені усадкові дефекти у вигляді підвищеної пористості.



Рис. 1. Зміна об'єму рідкої фази в процесі кристалізації без підігріву



Рис. 2. Кристалізація зливка з обігріванням надливної частини



Рис. 3. Вплив обігрівання та перемішування на формування зливка

Перемішування металу в серцевині зливка дозволило докорінно змінити умови кристалізації та усунути явища усадкового походження (рис. 3). Формування зливків за другим та третім варіантами відрізняється збільшенням часу затвердіння. Слід зазначити, що із застосуванням зовнішнього впливу відбувається зміна кута нахилу фронту кристалізації (рис. 4). Причому найбільший нахил фронту кристалізації спостерігався при спільній дії обігріву та перемішування, що позитивно позначається на усуненні усадкових дефектів.

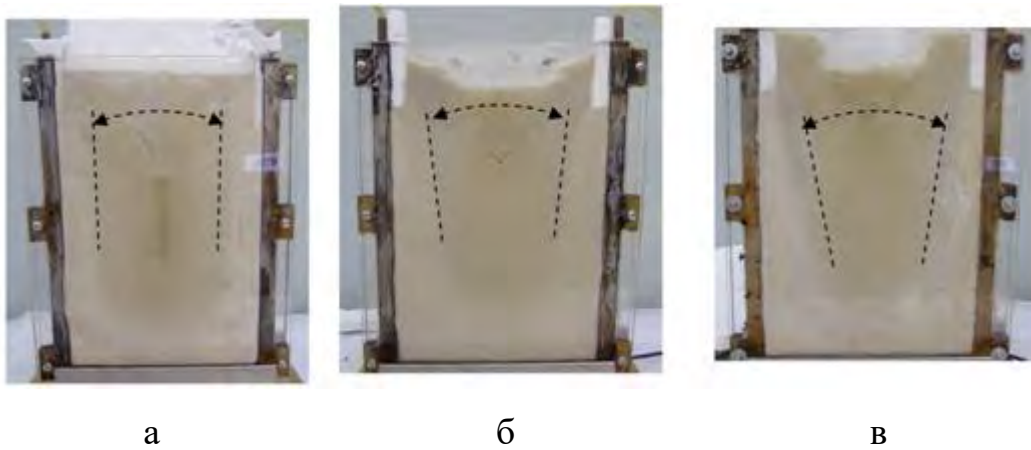


Рис. 4. Вплив зовнішніх чинників на кристалізаційні процеси в зливку:
а – без обігрівання, б – з обігріванням, в – обігрівання та перемішування

З урахуванням результатів моделювання в лабораторних умовах були проведені експерименти з відливанням сталевих злиwkів. Використовували сталь марки 20. Середній діаметр злиwkів становив 200 мм, а висота близько 500 мм. Для зменшення швидкості кристалізації та можливості здійснення перемішування рідкої серцевини злиwки відливали в піщано-глинясту форму. Стенд для моделювання був укомплектований електрошлаковим нагрівачем та пристроєм для перемішування металу. Рідкий метал отримували шляхом електрошлакової тигельної плавки металу з подальшим його розливанням у форму при температурі 1550...1560 °C. Було проведено два експерименти:

- без додаткового утеплення та обігрівання надливної частини злиwка;
- з обігріванням надливної частини злиwка та перемішуванням рідкого металу.

Фотографії макрошліфів осьових темплетів цих злиwkів наведені на рис. 5.

Видно, що за відсутності підігріву та утеплення головної частини злиwка у ньому утворюється об'ємна усадкова раковина. У Злиwку, отриманому із застосуванням підігріву і перемішування, незважаючи на порівняно велике співвідношення висоти до діаметру більше 2:1, усадкові дефекти повністю відсутні. У другому експерименті перемішування здійснювалося 4 рази під час затвердіння металу. На виявленій травленням макроструктурі добре видно сліди

трьох зовнішніх впливів. Сліди першого впливу відсутні. Мабуть, рідкий метал мав досить високу температуру перегріву і факт впливу не було зафіксовано. Три наступні впливи відображені на шліфі у вигляді світліших смуг, які, швидше за все, відповідають положенню фронту затвердіння під час перемішування.



Рис. 5. Макроструктура експериментальних зливків: а – без зовнішнього впливу, б – з підігріванням та перемішуванням

Отримані результати як фізичного, так і натурного моделювання з рідкою сталлю показують, що комбінований вплив на метал, що кристалізується, який включає підігрів прибутку і перемішування рідкої серцевини сталевих зливків, можна характеризувати як новий крок на шляху активного управління процесами кристалізації. Особливо це важливо для виробництва великих зливків з метою підвищення їхньої фізичної та хімічної однорідності.

Література:

1. Биктагиров Ф.К. Повышение качества крупных слитков / Биктагиров Ф.К., Шаповалов В.А., Ефимов М.В. и др. // Современная электрометаллургия –

2011 – № 1. – С. 7-11.

2. Митчелл А. Об изготовлении крупных поковок из сплавов, чувствительных к сегрегации // Современная электрометаллургия. – 2005. – №2. – С. 3-8.

3. Gamanyuk S.B., Rutsikii D.V., Zyuban N.A., Kirilichev M.V., Nikitin M.S., Gurulev D.N. Application of physical simulation to evaluate the impact of teeming method and rate on axial zone formation of large ingots. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022;65(11):814-823. Russ.) <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-11-814-823>

4. Макуров С.Л., Силкін Д.В. Дослідження впливу низькочастотної гідроімпульсної обробки в процесі затвердіння сталі на макроструктуру та неоднорідність великого сталюого злитку // Вісник приазовського державного технічного університету, 2013. – Серія: Технічні науки. – Вип.26. – С.40-45.

Шапошнікова Є.С., Наконечний С.О., Мініцький А.В., Юркова О.І.

(КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ)

ВИСОКОЕНТРОПІЙНІ СПЛАВИ НА ЗАМІНУ КОБАЛЬТОВОЇ ЗВ'ЯЗКИ В СПЛАВАХ НА ОСНОВІ КАРБІДУ ВОЛЬФРАМУ

E-mail: liza.shaposhnikova0312@gmail.com

Цементовані карбіди, також відомі як тверді метали, стали одним з найважливіших інженерних матеріалів з моменту їх винаходу на початку 1920-х років. Цементовані карбіди WC-Co застосовуються в багатьох сферах завдяки унікальному поєднанню твердості, в'язкості руйнування та стійкості до стирання. У своїй найпростішій формі ці матеріали складаються із зерен карбіду вольфраму в пластичному металевому зв'язуючому, як правило, кобальті. Вольфрамо-карбід-кобальтові матеріали мають високу твердість (майже до 20 ГПа [1]), густину ($\approx 15 \text{ г/см}^3$ [1, 2] при 10 мас. % Co), в'язкість руйнування ($>10 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ при 10 мас. % Co залежно від середнього розміру зерен вольфраму [3]) і міцність (межа міцності при поперечному розриві (TRS) понад 3000 МПа при 10 мас. % Co [1]).