
НОВІ МЕТОДИ ТА ПРОГРЕСИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЛИТТЯ

УДК 621.746.047

О. М. Смірнов, д-р техн. наук, пров. наук. співр., e-mail: stalevoz@i.ua

О. П. Верзілов, канд. техн. наук, ст. наук. співр.,

e-mail: verzilovalex@gmail.com

В. Є. Ухін*, канд. техн. наук, інженер

Ю. Ю. Куліш, мол. наук. співр., e-mail: deathrob@gmail.com

Д. І. Гойда, пров. інженер, e-mail: goydadaniil@gmail.com

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

* ВАТ «Шеффілд рефракторіс Україна» (Дніпро, Україна)

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ УСАДКОВОЇ РАКОВИНИ В УМОВАХ РОЗЛИВАННЯ СТАЛІ НА МАШИНАХ НАПІВБЕЗПЕРЕРВНОГО ЛИТТЯ ЗАГОТІВОК

В умовах металургійного мікрозаводу, як правило, відсутні завдання серійного розливання і при виробництві продукції з високоякісних сталей і сплавів досить ефективним є спосіб напівбезперервного лиття. Однією з основних проблем такого способу розливання є вихід придатного, величина якого менше порівняно з технологією безперервного лиття і залежить від усадкових процесів у головній частині заготовки, які отримують значний розвиток на завершальній стадії кристалізації. У свою чергу, величина і глибина поширення усадкової раковини значно залежить від умов тепловідведення в кристалізаторі, а також можливості підживлення усадкової порожнини новими порціями розплаву. У статті наведено результати фізичного моделювання, завдяки якому було проведено якісну і кількісну оцінку процесів формування усадкової раковини безперервнолитої заготовки, а також вивчено теоретичну можливість управління ними. Наведено обґрунтування вибору моделювальної речовини, опис лабораторної установки та методики проведення експериментів. Встановлено, що інтенсивність охолодження істотно впливає на процес формування усадкової раковини напівбезперервнолитої заготовки і має криволінійну залежність. Найменшу глибину усадкова раковина має при витраті води для охолодження кристалізатора в 2,25 л/хв і збільшується по лінійній залежності до значення витрати охолоджуючої рідини в 4, 1 л/хв. Подальша зміна глибини усадкової раковини при витратах води від 4, 1 до 14 л/хв носить складний криволінійний характер, що пов'язано з формуванням газового зазору між кіркою моделювальної речовини і стінкою гільзи кристалізатора лабораторної установки. Формування такого газового зазору знижує тепловий потік від заготовки до гільзи, про що свідчить зменшення глибини усадкової раковини в діапазоні витрат охолоджуючої води з 2,25 до 4, 1 л/хв.

Ключові слова: напівбезперервне розливання сталі, усадкова раковина, металургійний мікрозавод, кристалізатор, тепловідведення, моделювання.

Нові методи та прогресивні технології лиття

В умовах кризи і дефіциту фінансових ресурсів потенційні інвестори проявляють певний інтерес до будівництва металургійних мікрозаводів, які виробляють металопродукцію в обсягах менше 200 тис. т/рік. Особливий інтерес до металургійних мікрозаводів і модулів є у машинобудівних і металургійних підприємств, що бажають переробляти брухт чорних металів та відходи виробництва для власних потреб, а також підприємств, що займаються збором і реалізацією металобрухту. Крім того, спорудження мікровиробництв доцільно здійснювати в умовах діючих ливарних виробництв з метою їх реконструкції і технічного переоснащення, а також для розширення номенклатури продукції, що випускається. При цьому виникає можливість максимального використання існуючих будівельних, енергетичних, транспортних та інших об'єктів існуючого підприємства, що дозволяє істотно знизити питомі капітальні витрати на організацію нового виробництва [1–5].

Загальну схему сучасного мікрозаводу представлено на рис. 1. До основного технологічного устаткування можна віднести: дугову сталеплавильну піч (ДСП) або індукційну піч і агрегат для розливання сталі (машину напівбезперервного лиття заготівок (МНБЛЗ) або машину безперервного лиття заготівок (МБЛЗ)). У свою чергу, операції позапічної обробки в силу малого обсягу ковшів доцільно переносити в проміжний ківш агрегату для розливання сталі.

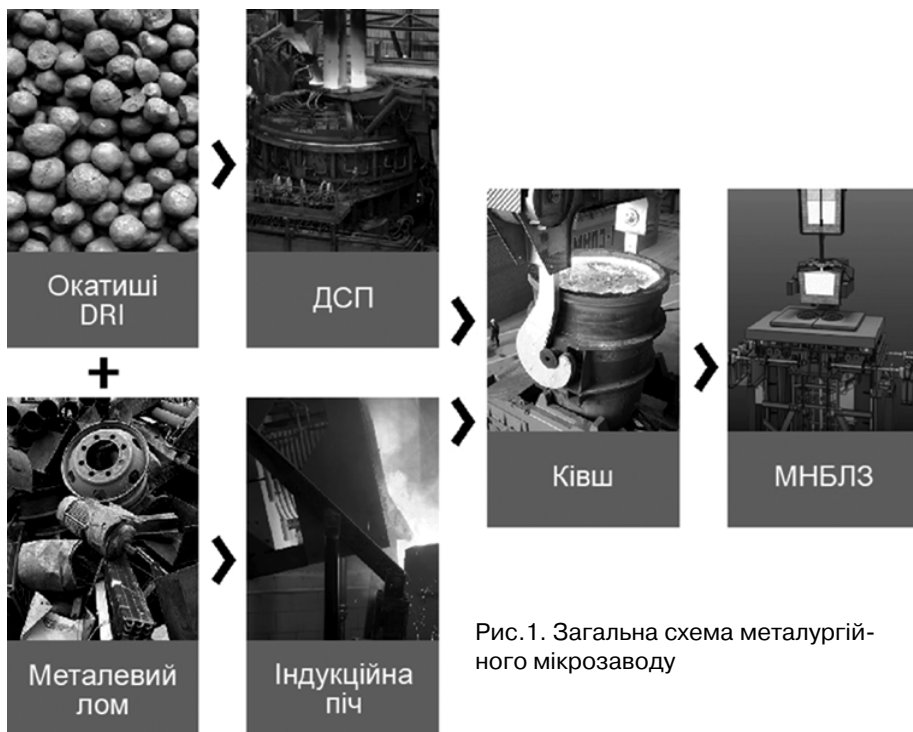


Рис. 1. Загальна схема металургійного мікрозаводу

В умовах металургійного мікрозаводу, як правило, відсутні завдання серійного розливання, і при виробництві продукції з високоякісних сталей і сплавів досить ефективним є спосіб напівбезперервного лиття. Однією з основних проблем такого способу розливання є вихід придатного, величина якого менше порівняно з технологією безперервного лиття і залежить від усадкових процесів у головній частині заготівки, які отримують значний розвиток на завершальній стадії кристалізації. У свою чергу, величина і глибина поширення усадкової раковини значно залежить від умов тепловідведення в кристалізаторі, а також можливості підживлення усадкової порожнини новими порціями розплаву. Однією з основних тенденцій розвитку технології напівбезперервного лиття є застосування вертикальних МНБЛЗ для отримання високоякісної заготівки.

Однак, незважаючи на те, що розливання на МНБЛЗ позиціонується як спосіб з кращими техніко-економічними показниками при гарантованому забезпеченні якості заготовки, існує низка питань, найважливішим з яких є проблема виходу придатного. Це обумовлено тим, що в головній частині заготовки утворюється усадкова раковина, величина і глибина поширення якої залежить від технології завершальної стадії безперервного розливання. Процес напівбезперервного лиття включає в себе як елементи технології безперервного лиття сталі, так і елементи лиття у виливниці. Ці особливості доповнюються і змінюються залежно від типу розливних машин.

Якщо при безперервному литті твердіння заготовки по перетину закінчується ще в процесі розливання, то при напівбезперервному литті повне твердіння заготовки закінчується через деякий час після розливання. В останньому випадку формування зовнішніх шарів заготовки відбувається аналогічно процесу безперервного лиття, а серцевина твердне, як у зливку, який відливався у виливницю. Такий характер твердіння порівняно з процесом формування злитків у виливниці підвищує фізичну і хімічну однорідність металу, але відносно безперервного лиття викликає розвиток ліквацийних явищ і усадкової раковини [6, 9].

Використання традиційних методів зменшення глибини усадкової раковини, які передбачають обігрів і теплоізоляцію головної частини зливка, при напівбезперервному литті пов'язано зі значними технологічними труднощами [7].

Відомо, що глибина усадкової раковини у злитках та заготовках напівбезперервного лиття становить значну частину їх довжини, в результаті чого до 10 % металу йде у відходи, що обумовлює необхідність вдосконалення процесу при виробництві заготовок і дослідження процесів формування усадкової раковини при напівбезперервному литті.

Метою проведеного фізичного моделювання була якісна і кількісна оцінка процесів формування усадкової раковини безперервнолитої заготовки, а також вивчення теоретичної можливості управління ними. При виконанні досліджень на фізичній моделі ставилися наступні завдання: обґрунтування вибору речовини для моделювання; створення фізичної моделі МНБЛЗ.

Для дослідження теплофізичних процесів і явищ формування твердої фази при твердінні на практиці зазвичай застосовують два типи моделей: «гарячі» і «холодні». Для «холодних» моделей прагнуть використовувати прозорі робочі речовини органічного та неорганічного походження. У науковій літературі досить докладно описано досліди на нафталіні, парафіні, воску, салолі, тимолі, бетолі, бензофенолі, камфені та інших речовинах. Прийнято вважати, що такі речовини забезпечують досить повне відтворення процесу просування фронту твердіння, теплопереносу, формування дефектів макроструктури і водночас дають уявлення про гідродинамічну картину в процесі твердіння. Однак більшість цих речовин вимагають спеціальних захисних заходів через токсичність їх парів і неприємних запахів [2, 8, 10]. Як показав аналіз, оптимальним для даного фізичного моделювання є парафін, що є нетоксичною, легкоплавкою речовиною, яка має значну об'ємну усадку і високу теплоємність. Основні властивості парафіну наведено в табл. 1.

Фізичне моделювання проводили на лабораторній установці МНБЛЗ вертикального типу, яка була виконана в масштабі 1:10 (рис. 2).

Одним з важливих елементів будь-якої МНБЛЗ є кристалізатор, тому що він визначає раціональну роботу машини і оптимальну якість заготовки. Для дослідження процесів теплопереносу на лабораторній установці було виготовлено кристалізатор, який представляє собою алюмінієву сорочку, всередині якої вмонтовано гільзу, виготовлену з мідної порожнистої труби круглого перетину. Між кожухом і гільзою кристалізатора передбачено зазор, через який з певною витратою пропускається вода для охолодження гільзи і відведення тепла від моделювальної речовини, що твердне.

Вивчення впливу інтенсивності охолодження заготовки в кристалізаторі МНБЛЗ на процес формування усадкової раковини проводився в два етапи. На першому етапі досліджень моделювався процес напівбезперервного розливання сталі (рис. 2). Для

Таблиця 1

Деякі властивості парафіну

Температура ліквідус, °C		52
Теплота кристалізації, кДж/кг		150,1
Теплоємність, кДж/(кг·K)	рідкий	3,86
	твердий	3,22
Температуропроводність, м ² /с	рідкий	7,5·10 ⁻⁸
	твердий	9,3·10 ⁻⁸
Щільність, кг/м ³	рідкий	764
	твердий	812
Поверхневий натяг, Н/м		0,027
Кінематична в'язкість, м ² /с		6,6·10 ⁻⁶

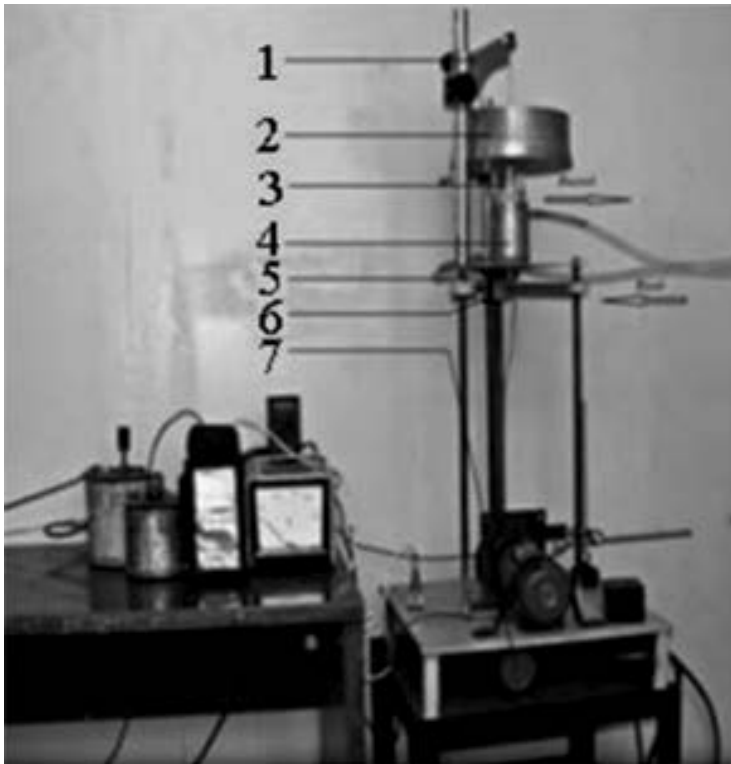


Рис. 2. Загальний вигляд лабораторної установки вертикальної МНБЛЗ: 1 – стопор і стопорний механізм; 2 – піч; 3 – захисна труба; 4 – мідний водоохолоджуваний кристалізатор; 5 – запал; 6 – кліть, що тягне; 7 – привід кліті, що тягне

цього парафін з печі 2 через захисну трубу 3 подається в мідний водоохолоджуваний кристалізатор 4. Дозування парафіну здійснюється за допомогою стопора і стопорного механізму 1. Заготівка витягується з кристалізатора за допомогою затравки 5 кліттю, що тягне 6, і її приводу 7. Довжина заготівки, що відливалася, визначалася величиною ходу затравки. Отримана в процесі моделювання заготівка охолоджувалася на повітрі у вертикальному положенні до повного твердіння. Технологічні параметри моделювання представлено в табл. 2.

По закінченню процесу твердіння утворилася усадкова раковина, яка заповнюва-

Технологічні параметри дослідження

Діаметр одержуваної заготовки, мм	Температура заливки парафіну, °С	Швидкість витяжки, м/хв	Витрата води, л/хв	Максимальна довжина заготовки, м
30	58±0,5	0,125	14–15	0,6

лась підфарбованою моделювальною речовиною для позначення меж і форми усадкової раковини. Цей метод дозволяє ідентифікувати не тільки кордони усадкової раковини, але і такі внутрішні дефекти безперервнолитої заготовки, як осьова пористість, порожнини, мости і т. і.

На другому етапі досліджень проводилася якісна і кількісна оцінка усадкових раковин в зразках, отриманих методом напівбезперервного розливання на фізичній моделі. Для цього кожен з 22 відлитих злитків було розрізано уздовж поздовжньої осі. Розрізані заготовки фотографували і по отриманих фотографіях проводилася якісна і кількісна оцінка параметрів усадкових раковин залежно від умов проведення експерименту (рис. 3).

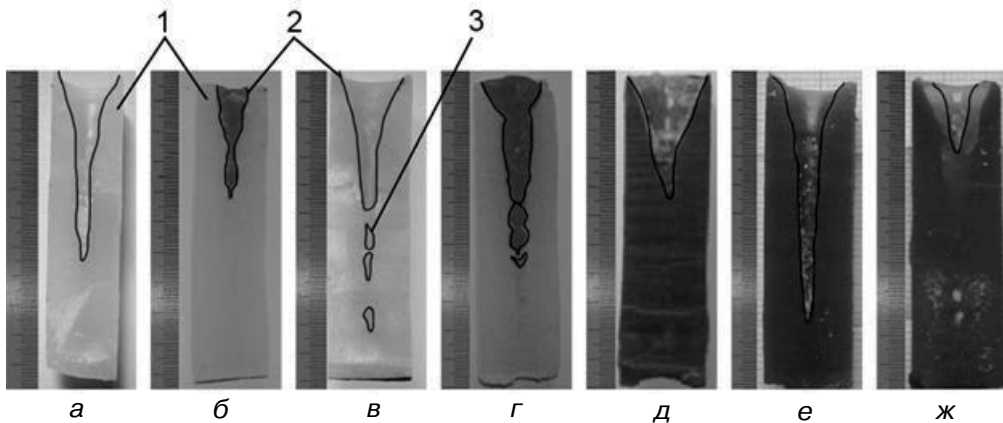


Рис. 3. Фотографії зразків при різних параметрах напівбезперервного розливання: а – кристалізація без охолодження 30 хв; б – кристалізація без охолодження з доливкою; в – кристалізація з максимальним охолодженням 16 хв; г – кристалізація з максимальним охолодженням і доливкою; д – кристалізація з максимальним охолодженням, доливкою, повною кристалізацією без охолодження; е – кристалізація без охолодження 20 хв, повною кристалізацією з охолодженням; ж – кристалізація без охолодження 25 хв, доливкою, повною кристалізацією з охолодженням 7 хв (1 – тіло злитка; 2 – усадкова раковина; 3 – порожнини від усадкової раковини)

У результаті аналізу даних фізичного моделювання встановлено, що інтенсивність охолодження істотно впливає на процес формування усадкової раковини напівбезперервнолитої заготовки і має криволінійну залежність, представлену на рис. 4. Як видно з рисунка, найменшу глибину усадкова раковина має при витраті води для охолодження кристалізатора в 2,25 л/хв і збільшується по лінійній залежності до значення витрати охолоджуючої рідини в 4,1 л/хв. Подальша зміна глибини усадкової раковини при витратах води від 4,1 до 14 л/хв носить складний криволінійний характер, що, мабуть, пов'язано з формуванням газового зазору між коринкою моделювальної речовини і стінкою гільзи кристалізатора лабораторної установки.

Формування такого газового зазору знижує тепловий потік від заготовки до гільзи, про що свідчить зменшення глибини усадкової раковини в діапазоні витрат охолоджуючої води з 2,25 до 4,1 л/хв.

Таким чином, проведені дослідження впливу інтенсивності тепловідведення в

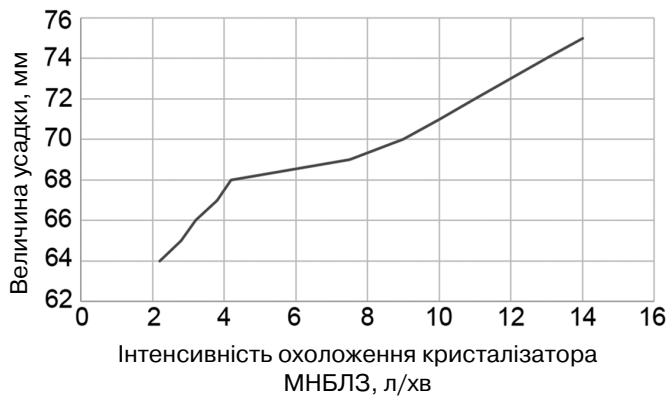


Рис. 4. Залежність глибини усадкової раковини від інтенсивності охолодження розплаву в кристалізаторі

кристалізаторі МНБЛЗ на формування усадкової раковини в заготівці дозволили зробити наступні **ВИСНОВКИ**:

- керуючи тепловідведенням у кристалізаторі МНБЛЗ при розливанні металів і сплавів можна впливати на глибину і форму усадкової раковини напівбезперервнолитой заготівки з метою зменшення обрізи і підвищення виходу придатного;
- контролюючи процес формування усадкової раковини для подальшого доливання металу або сплаву, що розливається, можна мінімізувати обріз головної частини заготівки і підвищити вихід придатного.

Список літератури

1. Смирнов А. Н. *Металлургические мини-заводы. Монография* / А. Н. Смирнов, В. М. Сафонов, Л. В. Дорохова, А. Ю. Цупрун. – Донецк: Норд-Пресс, 2005. – 469 с.
2. Смирнов А. Н. *Непрерывная разливка сортовой заготовки. Монография* / А. Н. Смирнов, С. В. Куберский, А. Л. Подкорытов, В. Е. Ухин, А. В. Кравченко, А.Ю. Оробцев. – Донецк: Цифровая типография, 2012. – 417 с.
3. Запускалов Н. «Микрозавод» – новая концепция в металлургии // *Черные металлы*. – 2004. – №11. – С. 10–24.
4. Смирнов А. Н. Конкурентоспособность микрометаллургических заводов: технологические аспекты / А. Н. Смирнов, С. В. Куберский, И. В. Шутов, Д. В. Спиридонов // *Сбор. науч. трудов*. Вып. № 34. – Алчевск: ДонГТУ. – 2011. – С.112–121.
5. Смирнов А. Н. Некоторые особенности развития концепции металлургических микрозаводов в Украине / А. Н. Смирнов, С. В. Куберский // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2012. – № 7. – С. 137–40.
6. Марченко И. К. *Полунепрерывное литье стали*. – Москва: Металлургия, 1986. – 246 с.
7. Смирнов А. Н. *Производство слитков стали и промышленных сплавов: учебное пособие* / А. Н. Смирнов, С. Л. Макуров, В. М. Сафонов. – Донецк: Ноулидж, 2013. – 436 с.
8. Смирнов А. Н. *Исследование особенностей формирования кристаллической структуры непрерывнолитой заготовки трапециевидного профиля* / А. Н. Смирнов, В. Е. Ухин, И. В. Шутов, В. А. Головатый // *Наукові праці ДонНТУ*. Вып. №13. – Донецк: ДонНТУ, 2011. – С. 113–121.
9. Головатый В. А. *Исследование влияния теплоотвода в кристаллизаторе МПНЛЗ на процесс формирования усадочной раковины* / В. А. Головатый, С. В. Куберский, В. Е. Ухин, Ю. Ю. Кулиш // VII Міжнародна науково-практична конференція «Донбас 2020: Перспективи розвитку очима молодих вчених», м. Донецьк. – 2014. – С. 21–29.
10. Смирнов А. Н. *Затвердевание металлического расплава при внешних воздействиях* / А. Н. Смирнов, В. Л. Пилюшенко, С. В. Момот, В. Н. Амитан. – Донецк: ВИК, 2002. – 169 с.

Поступила 16.10.2019

References

1. Smirnov, A. N., Safonov, V. M., Dorokhova, L. V., Tsuprun, A. Yu. (2005) Metallurgical mini-mills. Monograph. Donetsk: Nord-Press, 469 p. [in Russian].
2. Smirnov, A. N., Kubersky, S. V., Podkorytov, A. L., Ukhin, V. E., Kravchenko, A. V., Orobtsov, A. Yu. (2012) Continuous casting of billets. Monograph. Donetsk: Digital Printing House, 417 p. [in Russian].
3. Zapuskalov, N. (2004) «Micro-mill» – a new concept in metallurgy. Ferrous metals, no. 11, pp. 10–24 [in Russian].
4. Smirnov, A. N., Kubersky, S. V., Shutov, I. V., Spiridonov, D. V. (2011) Competitiveness of micro-metallurgical plants: technological aspects. Collection. scientific labor. Vol. 34. Alchevsk: DonSTU, pp. 112–121 [in Russian].
5. Smirnov, A. N., Kubersky, S. V. (2012) Some features of the development of the concept of metalurgical micro-mills in Ukraine. Metallurgical and mining industry, no. 7, pp. 137–140 [in Russian].
6. Marchenko, I. K. (2006) Semi-continuous casting of steel. Moscow: Metallurgy, 246 p. [in Russian].
7. Smirnov, A. N., Makurov, S. L., Safonov, V. M. (2013) The production of steel ingots and industrial alloys: a training manual. Donetsk: Knowledge, 436 p. [in Russian].
8. Smirnov, A. N., Ukhin, V. E., Shutov, I. V., Golovaty, V. A. (2011) Study of the features of the formation of the crystal structure of a continuously cast billet of a trapezoidal profile. Naukovi pratsi DonNTU. Vol. 13. Donetsk: DonNTU, pp. 113–121 [in Russian].
9. Golovaty, V. A., Kubersky, S. V., Ukhin, V. E., Kulish, Yu. Yu. (2014) Investigation of the effect of heat sink in the mold MPNLZ on the process of formation of a shrink shell. VII International Scientific-Practical Conference Donbas 2020: Prospects for Developing the Care of Young People. Donetsk, pp. 21–29 [in Russian].
10. Smirnov, A. N., Pilyushenko, V. L., Momot, S. V., Amitan, V. N. (2002) Solidification of a metal melt under external influences. Donetsk: VIK Institute, 169 p. [in Russian].

Received 16.10.2019

А.Н. Смирнов, д-р техн. наук, проф., вездущ. науч. сотр., e-mail: stalevoz@i.ua

А.П. Верзилев, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: verzilovalex@gmail.com

В.Е. Ухин*, канд. техн. наук, инженер

Ю.Ю. Кулиш, мл. науч. сотр., e-mail: deathrob@gmail.com

Д.И. Гойда, вездущ. инженер, e-mail: goydadaniil@gmail.com

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины (Киев, Украина)

* ВАТ «Шеффилд рефракторис Украина» (Днепр, Украина)

**ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ УСАДОЧНОЙ РАКОВИНЫ
В УСЛОВИЯХ РАЗЛИВКИ СТАЛИ НА МАШИНАХ ПОЛУНЕПРЕРЫВНОГО
ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК**

В условиях металлургического микрозавода, как правило, отсутствуют задачи серийной разливки и при производстве продукции из высококачественных сталей и сплавов достаточно эффективным способом является метод полунепрерывного литья. Одной из основных проблем такого способа разливки является выход годного, величина которого меньше по сравнению с технологией непрерывного литья и зависит от усадочных процессов в головной части заготовки, которые получают значительное развитие на завершающей стадии кристаллизации. В свою очередь, величина и глубина распространения усадочной раковины в значительной степени зависит от условий теплоотвода в кристаллизаторе, а также возможности подпитки усадочной полости новыми порциями расплава. В статье приведены результаты физического моделирования, благодаря которому была проведена качественная и количественная оценка процессов формирования усадочной раковины непрерывнолитой заготовки, а также изучены теоретические возможности управления ими. Приведено обоснование выбора моделирующего вещества, описание лабораторной установки и методики проведения экспериментов. Установлено, что интенсивность охлаждения существенно влияет на процесс формирования усадочной раковины заготовки и имеет криволинейную зависимость. Наименьшую глубину усадочная раковина имеет при расходе воды для охлаждения кристаллизатора в 2,25 л/мин

Нові методи та прогресивні технології лиття

и увеличивается по линейной зависимости до значения расхода охлаждающей жидкости в 4,1 л/мин. Дальнейшее изменение глубины усадочной раковины при расходе воды от 4,1 до 14 л/мин носит сложный криволинейный характер, что связано с формированием газового зазора между корочкой моделирующего вещества и стенкой гильзы кристаллизатора лабораторной установки. Формирование такого газового зазора снижает тепловой поток от заготовки к гильзе, о чем свидетельствует уменьшение глубины усадочной раковины в диапазоне расходов охлаждающей воды с 2,25 до 4,1 л/мин.

Ключевые слова: полунепрерывная разливка стали, усадочная раковина, металлургический микрозавод, кристаллизатор, моделирование.

A. N. Smirnov, Doctor of Engineering Sciences, Leading Researcher, e-mail: stalevoz@i.ua

A. P. Verzilov, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher, e-mail: verzilovalex@gmail.com

V. E. Ukhin*, Candidate of Engineering Sciences, Engineer

Yu.Yu. Kulish, Junior Researcher, e-mail: deathrob@gmail.com

D. I. Goyda, Leading Engineer, e-mail: goydadanil@gmail.com

Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

* PC «Sheffield Refraktor Ukraine» (Dnipro, Ukraine)

FEATURES OF THE FORMATION OF A SHRINK SHELL IN THE CONDITIONS OF CASTING STEEL ON SCCM

In the conditions of a metallurgical micro-mill, as a rule, there are no tasks of serial casting, and in the production of products of high quality steels and alloys a method of semi-continuous casting is quite effective. One of the main problems of this method of casting is the yield of a suitable value, which is smaller than the technology of continuous casting and depends on the shrinkage processes in the main part of the workpiece, which receive significant development at the final stage of crystallization. In turn, the magnitude and depth of distribution of the shrinkage shell largely depends on the conditions of heat dissipation in the mold, as well as the possibility of feeding the shrinkage cavity with new portions of the melt. The article presents the results of physical modeling, which led to a qualitative and quantitative assessment of the processes of forming a shrink shell of continuous casting, as well as to study the theoretical possibility of managing them. The substantiation of the choice of the modeling substance and the description of the laboratory installation and the methods of conducting the experiments are given. It is established that the intensity of cooling significantly influences the process of forming the shrinkage shell of a semi-continuous billet and has a curvilinear dependence. The shrinkage sink has the lowest depth at a flow rate of 2.25 l/min for cooling the mold and increases linearly with the coolant flow rate of 4.1 l/min. Further change in the depth of the shrinkage sink at water flow rates of 4.1 to 14 l/min has a complex curvilinear nature, which is associated with the formation of a gas gap between the crust of the modeling substance and the wall of the shell of the mold of the laboratory unit. The formation of such a gas gap reduces the heat flow from the workpiece to the sleeve, as evidenced by the decrease in the depth of the shrinkage sink in the flow rate of cooling water from 2.25 to 4.1 l/min.

Keywords: semi-continuous casting of steel, shrink shell, metallurgical micro-mill, mold, modeling.