

**УДК 621.74.041**

**П. Б. Калюжний**, канд. техн. наук, заст. директора;  
e-mail: kpb.ptima@gmail.com; ORCID 0000-0002-1111-4826

**О. Й. Шинський**, д-р техн. наук, проф., зав. відділу;  
ORCID 0000-0001-6200-0709

## **ВИЗНАЧЕННЯ ТРИВАЛОСТІ ПРИМУСОВОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ВИЛИВКІВ У КОНТЕЙНЕРАХ НА ЛИВАРНИХ РОТОРНО-КОНВЕЄРНИХ ЛІНІЯХ**

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

Стаття присвячена розробці методики визначення тривалості технологічного циклу охолодження виливків при аеродинамічному переміщенні дисперсного вогнетриву в контейнерах ливарних роторно-конвеєрних ліній. Застосування таких ліній є ефективним рішенням у збільшенні продуктивності ливарних технологій. Щоб відповідати принципам побудови роторно-конвеєрних ліній час охолодження виливків у ливарній формі, як один із найбільш тривалих технологічних процесів, має бути мінімізований. Це може бути досягнуто за рахунок примусового охолодження виливків із застосуванням аеродинамічного переміщення дисперсного вогнетриву в ливарному контейнері. Як приклад реалізації даного способу на ливарній роторно-конвеєрній лінії описано послідовність технологічних операцій на модулі охолодження. На основі термодинамічних розрахунків отримано вираз для визначення часу примусового охолодження, який залежить від теплофізичних і геометричних характеристик виливка, коефіцієнта тепловіддачі та температурного напору на поверхні виливка. Наведено приклад розрахунку часу примусового охолодження сталевих виливків. Показано, що при застосуванні аеродинамічного переміщення дисперсного вогнетриву в контейнері час охолодження виливків до температури вибивання може бути скорочений в 6,6–7,5 разів порівняно з звичайним охолодженням в піщаній формі. За рахунок зміни швидкості потоку повітря, яким зріджують вогнетрив, операцією примусового охолодження можна гнучко керувати для різних виливків, які виготовляються на ливарних роторно-конвеєрних лініях.

**Ключові слова:** виливок, час охолодження, дисперсний вогнетрив, температура, роторно-конвеєрна лінія.

Одним із актуальних наукових і практичних завдань для ливарного виробництва є суттєве збільшення продуктивності при зниженні енергоємності, матеріаломісткості, трудомісткості, зменшенні виробничих площ та виключення суб'єкта з технологічного циклу виробництва литих виробів. Ефективним рішенням даного завдання є застосування ливарних роторно-конвеєрних ліній (РКЛ), які, в першу чергу, відрізняються від автоматичних формувальних ліній мінімізацією використовуваних матеріалів, чисельності технологічних операцій і відповідно задіяного обладнання.

Аналіз заданих умов щодо реалізації швидкісних технологій для використання принципів побудови РКЛ у порівнянні з можливостями сучасних ливарних технологій для одержання виливків у піщаних формах з залізобетонних та кольорових сплавів дозволяє стверджувати, що оптимальними для адаптації до швидкісних технологій є різновиди лиття за моделями, що газифікуються (ЛГМ).

Виробництво деталей литтям у піщаних формах зазвичай характеризується низькою продуктивністю, що обумовлено досить тривалим процесом охолодження виливків у ливарних формах. Основними принципами побудови РКЛ є максимальна швидкість переміщення предмету (оснащення), мінімальний час формоутворення предмета (піщаної форми, твердіння виливка), максимальна щільність потоку переміщення предметів (форм, виливків) та мінімальна ширина потоку переміщення

предметів (форм, виливків) [1]. Тому важливим завданням, особливо з точки зору впровадження в роторно-конвеєрний ливарний модуль, є збільшення швидкості охолодження металу після його затвердіння і скорочення до мінімуму тривалості охолодження виливка в ливарній формі.

Дана задача може бути досягнута за рахунок примусового охолодження виливків та дисперсного вогнетриву в ливарних формах, а у випадку лиття за моделями, що газифікуються, в ливарних контейнерах. Для примусового охолодження можна застосовувати різновиди методів, які розроблені в ФТІМС НАН України, такі як застосування газоподібних та рідких холодоагентів [2], використання гравітаційного перебігу [1] й аеродинамічного переміщення дисперсного вогнетриву [3]. Дані методи дозволяють з різною інтенсивністю пришвидшити охолодження виливків, останній метод є найбільш ефективним.

Аеродинамічне переміщення дисперсного вогнетриву при ЛГМ можливе завдяки використанню в ливарних формах вогнетриву без сполучних речовин. Під дією висхідного потоку повітря частинки вогнетриву приводяться в псевдозріджений стан, створюючи умови для інтенсивного його перемішування. Взагалі швидкість охолодження в псевдозрідженому шарі, наприклад, кварцового піску більша за швидкість охолодження на повітрі, однак менша ніж в маслі чи воді [4]. Дослідження [5] показують, що у такий спосіб швидкість охолодження виливка можна збільшити на порядок, наприклад, для алюмінієвого виливка швидкість охолодження від 600 до 400 °C вдалося збільшити в 20 разів порівняно з традиційним ЛГМ процесом. Використання примусового охолодження має враховувати ливарні процеси, які відбуваються у виливку та ливарній формі. Тому актуальною є розробка методик визначення технологічних циклів примусового охолодження виливків, що дозволить ефективно керувати процесами формування виливка при їх реалізації на ливарних РКЛ.

Метою даної статті є розробка методики визначення тривалості охолодження виливків при аеродинамічному переміщенні дисперсного вогнетриву в контейнерах для реалізації на ливарних РКЛ.

Швидкість охолодження виливка можна охарактеризувати як зміну його температури за певний проміжок часу. Оскільки температура за своєю сутністю є фізичною величиною, що описує стан термодинамічної системи, то в основу розрахунків покладені термодинамічні закони та рівняння.

Згідно класифікації Вейника [6] виливок проходить п'ять стадій охолодження: «Перша стадія відповідає заливанню форму розплавленим металом, друга – охолодженню рідкого металу після завершення заливки, третя – твердненню металу, четверта – охолодженню в формі повністю затверділого виливка і п'ята – охолодженню виливка після видалення його з форми.»

Протягом першої стадії, тобто під час заливання форми, тривалість якої складає  $\tau_{\text{зал}}$ , відбувається охолодження металу від температури заливання  $T_{\text{зал}}$  до певної температури  $T_1$ . Протягом другої стадії відбувається охолодження виливка від  $T_1$  до температури ліквідус сплаву  $T_L$ . З термодинамічної точки зору протягом перших двох стадій виливок втрачає теплоту перегріву металу  $Q_{\text{пер}}$ , яка може бути визначена за формулою:

$$Q_{\text{пер}} = c_p \cdot m_v \cdot (T_{\text{зал}} - T_L), \quad (1)$$

де  $c_p$  – питома теплоємність сплаву в рідкому стані, Дж/(кг·°C);  $m_v$  – маса виливка з ливниковою системою, кг.

Третя стадія охолодження виливка відповідає процесу тверднення металу. Протягом даної стадії сплав переходить з рідкого в твердий стан, при цьому його температура знижується від  $T_L$  до  $T_s$ . Кількість тепла, яке виділяє виливок при твердненні:

$$Q_{\text{ТВ}} = L_{\text{еф}} \cdot m_v, \quad (2)$$

де  $L_{\text{еф}}$  – ефективна теплота тверднення сплаву, що враховує його охолодження від температур ліквідус до солідус, Дж/кг.

Протягом четвертої стадії виливок охолоджується від  $T_s$  до температури вибивання  $T_2$  і втрачає при цьому кількість тепла  $Q_{ox}$ , яка може бути визначена за формулою:

$$Q_{ox} = c_{тв} \cdot m_{в} \cdot (T_s - T_2), \quad (3)$$

де  $c_{тв}$  – питома теплоємність сплаву в твердому стані, Дж/(кг·°C).

Час твердіння виливків  $\tau_{тв}$  в піщаній формі з достатньою точністю може бути визначений за формулою Г. Ф. Баландіна [7]:

$$\tau_{тв} = \mu \cdot \left\{ \frac{R_{пр} \cdot \left[ L_{эф} \cdot \rho_{т-р} + c_p \cdot \rho_p \left( \frac{T_{зал} - T_L}{T_{зал} - T_{\phi}} \right) \cdot (T_L - T_{\phi}) \right]}{1,128 \cdot b_{\phi} (T_L - T_{\phi})} \right\}^2, \quad (4)$$

де  $R_{пр}$  – приведена товщина виливка, м;  $\rho_{т-р}$  – густина сплаву в твердо-рідкому стані при його охолодженні в інтервалі кристалізації, її знаходять як середню величину між  $\rho_{тв}$  і  $\rho_p$ , кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{тв}$  і  $\rho_p$  – густина сплаву, відповідно в твердому і рідкому стані, кг/м<sup>3</sup>;  $T_{\phi}$  – температура форми, °C;  $b_{\phi}$  – теплоакумуюча здатність форми,  $\frac{\text{Вт} \cdot \text{с}^{1/2}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ ;  $\mu$  – коефіцієнт, що враховує конфігурацію виливка.

Найдовшою за тривалістю з розглянутих стадій охолодження виливка є четверта, саме тому стосовно неї має застосовуватися примусове охолодження. Як згадувалося вище збільшити швидкість охолодження виливка можна застосувавши аеродинамічне переміщення дисперсного вогнетриву в формі. Зростання тепловідбору дисперсним вогнетривом відбувається при переведенні його із нерухомого в псевдозріджений стан за рахунок зміни механізму теплообміну.

Для визначення температурно-часових параметрів процесу примусового охолодження важливо знати температури виливка та піску на початок дії аеродинамічного переміщення вогнетриву. Якщо прийняти за початок примусового охолодження момент досягнення виливком  $T_s$ , тобто повного тверднення металу, то виливок пройде три стадії охолодження. При цьому він виділить кількість тепла, яка визначається як сума  $Q_{пер}$  та  $Q_{тв}$ .

З іншого боку перші три стадії охолодження виливка супроводжуються нагріванням ливарної форми. Температурні поля піщаної ливарної форми описуються рівнянням параболи n-го порядку [7]. Однак враховуючи той факт, що під час псевдозрідження дисперсний вогнетрив (пісок) інтенсивно перемішується, то його температура в усьому об'ємі форми швидко вирівнюється. Якщо прийняти, що пісок в формі нагріється від початкової температури  $T_{п1}$  до якогось середнього значенню  $T_{п2}$ , то його можна буде визначити з даної формули:

$$Q_{п} = c_{п} \cdot m_{п} \cdot (T_{п2} - T_{п1}), \quad (5)$$

де  $Q_{п}$  – кількість тепла, яку отримує пісок від виливка з початку заливання металу і до початку примусового охолодження, Дж;  $c_{п}$  – питома теплоємність піску, Дж/(кг·°C);  $m_{п}$  – маса піску в контейнері, кг.

Тобто на момент початку дії аеродинамічного переміщення будемо мати наступні умови: температура виливка буде  $T_s$ , температура піску в формі –  $T_{п2}$ .

Після приведення в рух частинок піску відбувається зміна механізму теплообміну між виливком та формувальним матеріалом. В такому випадку кількість тепла, яка втрачається виливком за час  $dt$  може бути визначена із рівняння за законом Ньютона:

$$dQ = \alpha (T_{\text{в}} - T_{\text{ш}}) F_{\text{пов}} d\tau, \quad (6)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі на поверхні виливка, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $T_{\text{в}}$  – температура поверхні виливка, °С;  $T_{\text{ш}}$  – температура шару піску, умовно може бути прийнята рівною  $T_{\text{п2}}$ , °С;  $F_{\text{пов}}$  – площа поверхні охолодження виливка, м<sup>2</sup>.

Зміна кількості тепла виливком також може бути виражена через зміну його температури, теплоємність і масу, тоді рівняння (6) запишеться в наступному вигляді:

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{\alpha F_{\text{пов}}}{m_{\text{в}} c_{\text{ТВ}}} (T_{\text{в}} - T_{\text{ш}}) \quad (7)$$

Проінтегрувавши дане рівняння отримаємо наступний вираз:

$$T_{\text{в2}} - T_{\text{ш}} = (T_{\text{в1}} - T_{\text{ш}}) e^{-\frac{\alpha F_{\text{пов}}}{m_{\text{в}} c_{\text{ТВ}}} \tau} \quad (8)$$

Після перетворень та логарифмування отримуємо вираз:

$$\frac{\alpha F_{\text{пов}}}{m_{\text{в}} c_{\text{ТВ}}} \tau = \ln \left| \frac{T_{\text{в1}} - T_{\text{ш}}}{T_{\text{в2}} - T_{\text{ш}}} \right| \quad (9)$$

Тобто час  $\tau$ , за який виливок знаходячись в аеродинамічному полі вогнетриву охолоне від температури  $T_{\text{в1}}$  до  $T_{\text{в2}}$ , може бути виражений із (9), та визначатиметься за формулою:

$$\tau = \frac{m_{\text{в}} c_{\text{ТВ}}}{\alpha F_{\text{пов}}} \ln \left| \frac{T_{\text{в1}} - T_{\text{ш}}}{T_{\text{в2}} - T_{\text{ш}}} \right| \quad (10)$$

Останній множник у формулі (10) виражає температурний напір на поверхні виливка, тобто поверхні теплообміну. Слід відзначити, що він буде опосередковано залежати від співвідношення маси виливка та маси вогнетриву в контейнері, яке в практиці ЛГМ складає від 4,0 до 6,0. Чим менша кількість вогнетриву буде в формі, тим більше він прогріється на перших стадіях охолодження виливка. А також чим менша кількість вогнетриву буде задіяна в теплообміні, тим меншою буде інтенсивність примусового охолодження виливка.

Якщо масу виливка виразити через його об'єм, а об'єм виливка через приведену товщину виливка, то вираз (10) прийме наступний вигляд:

$$\tau = \frac{\rho_{\text{ТВ}} c_{\text{ТВ}} R_{\text{пр}}}{\alpha} \ln \left| \frac{T_{\text{в1}} - T_{\text{ш}}}{T_{\text{в2}} - T_{\text{ш}}} \right| \quad (11)$$

Коефіцієнт тепловіддачі псевдозрідженого шару піску, який, як було показано в роботі [8], залежить від швидкості потоку повітря, розміру частинок вогнетриву (піску) та їх теплофізичних характеристик. Максимальний коефіцієнт тепловіддачі від псевдозрідженого повітрям шару частинок до тіла (в нашому випадку виливка) може бути визначений за формулою Забродського [9]:

$$\alpha_{\text{max}} = 35,7 \cdot \rho_{\text{ч}}^{0,2} \lambda_{\text{г}}^{0,6} d_{\text{ч}}^{-0,36} \quad (12)$$

де  $\rho_{\text{ч}}$  і  $d_{\text{ч}}$  – густина матеріалу частинок і середній діаметр частинки;  $\lambda_{\text{г}}$  – теплопровідність газу.

Наприклад, для кварцового піску з еквівалентним діаметром піщинок 0,25 мм псевдозрідженого повітрям  $\alpha_{\text{max}}$  складе  $383 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}}$ . Однак за даними роботи [9] практично на виробництві спостерігаються дещо менші значення  $\alpha \approx 200\text{--}300 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}}$ , що потрібно враховувати в розрахунках.

На основі викладеного вище матеріалу технологічний процес охолодження виливків та дисперсного вогнетриву з його аеродинамічним переміщенням у контейнерах на роторно-конвеєрних модулях можна описати наступним чином (рисунк.). Після заливання металу в форму контейнер витримується під вакуумом на позиції тверднення металу протягом часу, який забезпечить твердіння металу не менш як на 40 % його об'єму. Далі контейнер передається на наступну позицію, де з нього знімається синтетична плівка та встановлюється наповнювана рамка. При цьому відбувається повне тверднення металу виливків. На наступній позиції до газорозподільної решітки подається стиснене повітря, за рахунок чого пісок в контейнері приводиться в аеродинамічний рух, і виливки починають інтенсивно охолоджуватися. При переміщенні контейнеру на наступну позицію немає необхідності підтримувати псевдозрідження піску, оскільки така короточасна операція переривання примусового охолодження буде сприяти вирівнювання температур по перетину виливка. На наступній позиції (одній чи декількох) продовжується примусове охолодження виливків, як і на попередній позиції. Після чого контейнер з виливками, який досяг температури вибивки, переміщується на позицію ізотермічної витримки, а після цього на позицію вибивання.

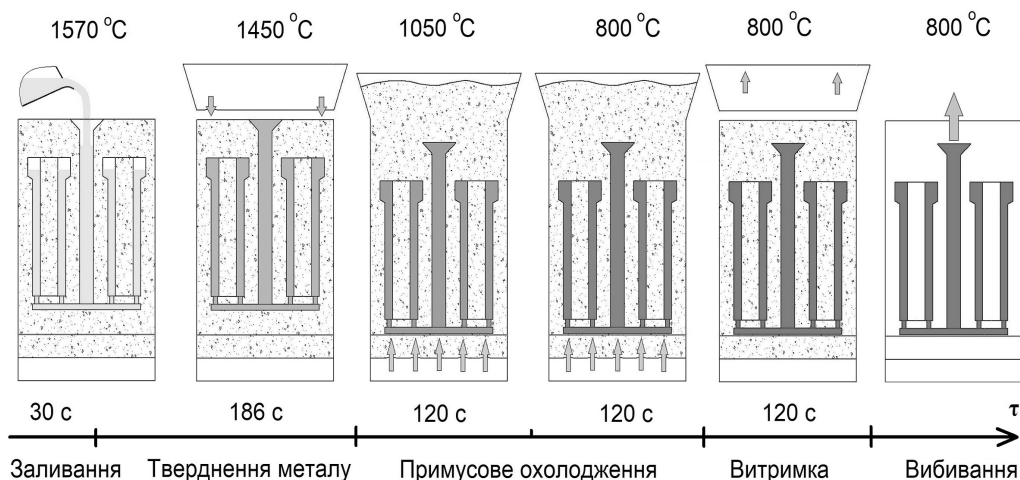


Схема процесу охолодження виливків на роторно-конвеєрному модулі

Для роторно-конвеєрних модулів важливим параметром, який задає «ритм» конвеєра є час технологічної операції. Для визначення тривалості технологічного циклу розраховують час заливання металу, час тверднення виливка та тривалість примусового охолодження.

Для прикладу на основі розробленої методики виконаємо розрахунки для сталевих циліндричних виливків з  $R_{пр} = 0,014$  м, які одержують за моделями, що газифікуються, на ливарній РКЛ. Ливарний куц загальною масою 120 кг отримують в ливарному контейнері  $0,8 \times 0,5 \times 1,0$  м. Теплофізичні характеристики сталі:  $c_p = 920$  Дж/(кг·°C);  $c_{тв} = 750$  Дж/(кг·°C);  $\rho_{тв} = 7800$  кг/м³;  $\rho_p = 7200$  кг/м³;  $L_{эф} = 294000$  Дж/кг;  $T_{зал} = 1570$  °C;  $T_L = 1500$  °C;  $T_s = 1450$  °C. Кварцовий пісок, маса якого складає 600 кг, має наступні теплофізичні характеристики:  $c_n = 840$  Дж/(кг·°C);  $T_{п1} = 20$  °C,  $b_\phi = 1630 \frac{\text{Вт} \cdot \text{с}^{1/2}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ .

Час тверднення сталевих виливків у піщаній формі за формулою (4) складе 186 с.

Будемо рахувати, що ливарний контейнер подається на позицію примусового охолодження при температурі рівній  $T_s$  сталі. Визначимо середню температуру

піску  $T_{n2}$ , яка буде на початок примусового охолодження. При цьому враховуємо, що кількість тепла, яку отримав пісок від виливка враховує тепло перегріву та тепло, що виділяється при твердненні металу, які розраховуємо за формулами (1) та (2). Отже за формулою (5)  $T_{n2} = 105^{\circ}\text{C}$ .

Час охолодження сталевих виливків до температури  $900^{\circ}\text{C}$  в псевдозрідженому шарі піску (при  $\alpha = 240 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ ,  $T_{\text{ш}} = 105^{\circ}\text{C}$ ) за формулою (11) складе 179 с. У випадку, коли сталеві виливки необхідно охолодити до температури  $800^{\circ}\text{C}$ , то тривалість примусового охолодження складе 225 с.

Якщо для роторно-конвеєрного модулю охолодження сталевих виливків задати тривалість технологічного циклу 120 с, то операції заливання (~30 с) і тверднення металу вкладуться в 2 цикли (див. рис.). За один цикл примусового охолодження виливки можна буде охолодити до  $1050^{\circ}\text{C}$ . За два цикли (240 с) – до  $780^{\circ}\text{C}$ . Якщо ж необхідно буде досягти нижчої температури вибивання, то необхідно ввести ще один чи декілька циклів примусового охолодження з застосуванням аеродинамічного переміщення формувального матеріалу в контейнері. Далі контейнер передається на позицію, де відбувається витримка виливків для вирівнювання температур в об'ємі виливка, а потім вибивання виливків з піском з контейнеру. Після чого виливки переміщуються в зону охолодження або ж передаються на термічне оброблення. В останньому варіанті зменшуються енерговитрати на нагрівання виливків у термічних печах.

У випадку знаходження цих виливків у піщаній формі в нерухомому сухому піску час охолодження затверділих виливків до температури  $900^{\circ}\text{C}$  (визначений за формулою Г.Ф. Баландіна [7]) складе 1188 с, а до  $800^{\circ}\text{C}$  – 1700 с. Що, відповідно, у 6,6 та 7,5 разів довше ніж при примусовому охолодженні із аеродинамічним переміщенням дисперсного вогнетриву в контейнері. Зі зменшенням температури вибивки ефективність застосування примусового охолодження буде зростати. Це пояснюється зменшенням інтенсивності охолодження виливка у традиційній піщаній формі у міру його остигання через прогрів прошарків піску і падінням температурного напору. При псевдозрідженні піску інтенсивність охолодження залишається високою через підтримання високого температурного напору на поверхні виливка. Окрім того швидкість охолодження виливків може регулюватися швидкістю потоку повітря, яким зріджують пісок у контейнері. Це дозволяє «гнучко» керувати циклом технологічної операції примусового охолодження для різних виливків, які виготовляються на ливарних РКЛ.

Запропонована методика розрахунку тривалості примусового охолодження виливків може бути використана при проектуванні ливарних роторно-конвеєрних ліній та технологічних процесів одержання виливків на них.

### **Список літератури**

- 1 Дорошенко В.С., Калюжний П.Б., Шинський В.О. Технологічні засади створення швидкісних процесів лиття у вакуумовані ливарні форми для роторно-конвеєрних комплексів. *Процеси лиття*. 2018. № 3. С. 23–34.
- 2 Шинський О. Й., Дорошенко В. С., Кравченко В. П. Інтенсифікація теплообміну виливка з дисперсним наповнювачем ливарної форми при використанні холодоагенту та примусової конвекції. *Процеси лиття*. 2009. № 5. С. 74–82.
- 3 Kaliuzhnyi P. Influence of Sand Fluidization on Structure and Properties of Aluminum Lost Foam Casting. *Archives of Foundry Engineering*. 2020. Vol. 20. No. 1. P. 122–126. DOI: 10.24425/afe.2020.131293.
- 4 Баскаков А.П. Скоростной безокислительный нагрев и термическая обработка в кипящем слое. М.: Металлургия, 1968. 223 с.

- 5 Шалевская И.А., Калюжный П.Б. Применение псевдоожиженного слоя в технологическом процессе производства отливок в вакуумируемые формы. *Металл и литье Украины*. 2015. №4. С. 19–21.
- 6 Вейник А. И. Теория затвердевания отливок. М.: Машгиз, 1960. 430 с.
- 7 Баландин Г.Ф. Основы теории формирования отливки. Ч. 1. Тепловые основы теории. Затвердевание и охлаждение отливки. М.: Машиностроение, 1976. 328 с.
- 8 Калюжный П.Б., Шалевская И.А., Яковышин О.А. Исследование метода управления процессом кристаллизации отливок в вакуумируемых формах. *Металл и литье Украины*. 2015. №8. С. 24–28.
- 9 Тодес О.М., Цитович О.Б. Аппараты с кипящим зернистым слоем: Гидравлические тепловые основы работы. Л.: Химия, 1981. 296 с.

Надійшла 04.02.2023

### References

- 1 Doroshenko V.S., Kaliuzhnyi P.B., Shinskiy V.O. (2018) Technological principles of creation of speed processes of casting in the vacuumized molds for rotor-conveyer complexes. *Casting processes*. No 3. P. 23–34. [in Russian].
- 2 Shinskiy O.I., Doroshenko V.S., Kravchenko V.P. (2009) Intensification of heat exchange of casting with dispersed refractory of mould at application of cooler and forced convection. *Casting processes*. No 5. P. 74–82 [in Russian].
- 3 Kaliuzhnyi P. (2020) Influence of Sand Fluidization on Structure and Properties of Aluminum Lost Foam Casting. *Archives of Foundry Engineering*. Vol. 20. No. 1. P. 122–126. DOI: 10.24425/afe.2020.131293.
- 4 Baskakov A.P. (1968) Skorostnoj bezokislitel'nyj nagrev i termicheskaja obrabotka v kip-jashhem sloe. [High-speed non-oxidizing heating and heat treatment in fluidized bed]. М.: Metallurgija. 223 p. [in Russian].
- 5 Shalevskaya I. A., Kaliuzhnyi P. B. (2015) Fluidized bed application of in technological process of casting production in vacuumized moulds. *Metal and casting of Ukraine*. No 4. P. 19–21. [in Russian].
- 6 Veinik A. I. (1960). Teoriia zatverdevaniia otlivok. [Heory of casting solidification]. М.: Mashgiz. 430 p. [in Russian].
- 7 Balandin G.F. (1976) Osnovy teorii formirovaniia otlivki. Ch. 1. Teplovye osnovy teorii. Zatverdevanie i okhlazhdenie olivki. [Fundamentals of the theory of casting formation. Part 1. Thermal foundations of the theory. Solidification and cooling of the casting]. М.: Mashinostroenie. 328 p. [in Russian].
- 8 Kaliuzhnyi P.B., Shalevskaja I.A., Jakovyshin O.A. (2015) Research control method of the castings crystallization process in vacuumized moulds. *Metal and casting of Ukraine*. No. 8, P. 24–28 [in Russian].
- 9 Todes O.M., Tsitovich O.B. (1981) Apparaty s kipiashchim zernistym sloem: Gidravlicheskie i teplovye osnovy raboty [Fluidized Bed Apparatus: Hydraulic and Thermal Fundamentals of Operation]. Л.: Khimiia. 296 p. [in Russian].

Received 04.02.2023

**P. B. Kaliuzhnyi**, PhD (Engin.), Deputy Director; e-mail: kpb.ptima@gmail.com;  
ORCID 0000-0002-1111-4826

**O. Y. Shinsky**, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Head of Department; e-mail: aluprt@ukr.net;  
ORCID 0000-0001-6200-0709

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

## **DETERMINATION OF THE DURATION OF FORCED COOLING OF CASTINGS IN CONTAINERS ON FOUNDRY ROTARY-CONVEYOR LINES**

*The article is devoted to the developing of a methodology for determining the duration of the technological cycle of cooling castings during the aerodynamic movement of dispersed refractory in containers of foundry rotary-conveyor lines. The use of rotary-conveyor lines is an effective solution for increasing the productivity of foundry technologies. To comply with the principles of construction of rotary-conveyor lines, the cooling time of castings in a mold, as one of the longest technological processes, must be minimized. This can be achieved by forced cooling of castings using the aerodynamic movement of dispersed refractory in the foundry container. As an example of the implementation of this method on a foundry rotary-conveyor line, the sequence of technological operations on the cooling module is described. Based on thermodynamic calculations, an expression for determining the time of forced cooling was obtained, which depends on the thermophysical and geometric characteristics of the casting, the heat transfer coefficient and the temperature pressure on the surface of the casting. An example of calculating the time of forced cooling of steel castings is given. It is shown that when applying the aerodynamic movement of dispersed refractory in the container, the cooling time of the castings to the knocking temperature can be reduced by 6.6–7.5 times compared to the conventional cooling in the sand mold. By changing the airflow rate that liquefies the refractory, the forced cooling operation can be flexibly controlled for different castings that are produced on foundry rotary-conveyor lines.*

**Keywords:** casting, cooling time, dispersed refractory, temperature, rotary-conveyor line.