

УДК 621.746.62

О. Д. Семенов, аспірант

В. Є. Хричиков, д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри;
e-mail: litpro.kaf@gmail.com

В. З. Куцова, д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри

О. В. Меньяло, д-р техн. наук, доцент

Національна металургійна академія України (Дніпро, Україна)

РОЗРАХУНОК КІНЕТИКИ ПРОСУВАННЯ ФРОНТУ КРИСТАЛІЗАЦІЇ ІЗОСОЛІДУС ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВИХ СПЛАВІВ У КОКІЛЬНИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ФОРМАХ

Мета роботи – оцифрування експериментальних термографічних вимірів процесів твердіння в кокілі циліндричних виливків із залізовуглецевих сплавів, їх інтерполяція для діапазону вмісту вуглецю 0,1...4,83 % і розробка графоаналітичної методики побудови кінетики просування фронту ізосолідус. Сучасні аналітичні розрахунки твердіння і охолодження виливків методом інтегрального теплового балансу Стефана-Шварца, А. І. Вейника, М. І. Хворінова не дозволяють встановити вплив хімічного складу сплаву, повітряного зазору між затверділим шаром металу і кокілем, ступінь чорноти поверхні, розширення кокілю при нагріванні, усадки метала виливка та залежність теплофізичних коефіцієнтів від температури. Програми комп'ютерного моделювання процесів затвердіння підвищують точність розрахунків тільки за умови адаптації з результатами експериментальних вимірювань температур твердіння виливків, що мають конкретний хімічний склад. В роботі оцифровано результати дев'яти експериментальних досліджень процесів твердіння циліндричних виливків зі сплавів Fe–C, отримані Б. Б. Гуляєвим, О. Н. Магницьким, Л. М. Постновим в координатах параметричного критерію (τ/R^2) і відносної товщини (x/R) затверділого шару металу (x). Отримані залежності кристалізації 100 % твердої фази з кроком 0,05 x/R інтерполювали в діапазоні вмісту вуглецю 0,04...4,83 %. Наведено приклади розрахунку тривалості твердіння циліндричних виливків різних хімічних складів, а за гіпотезою приведеної товщини М. І. Хворінова можливо встановити в першому наближенні тривалість затвердіння виливків у формі куля і плита. Отримані результати рекомендовано використовувати для оцінки точності комп'ютерного моделювання процесів затвердіння еталонних сплавів Fe–C і подальшого корегування теплофізичних коефіцієнтів, які взято в розрахунках. Побудовано кінетику просування фронту ізосолідус для сплаву Fe–0,3%С, який охолоджується в циліндричній виливниці, розрахована його загальна тривалість затвердіння. Використовуючи графіки в координатах τ/R^2 і x/R можна розрахувати тривалість кристалізації виливків різних розмірів, мінімальний час безпечного переміщення виливниці зі злитком з кесона до ділянки охолодження виливків для виконання технології гарячого посаду злитка в термічну піч, реалізувати технологію впливу на рідкий метал в ливарній формі або газодинамічного тиску в процесі кристалізації рідкої фази.

Ключові слова: виливок, циліндр, затвердіння, Fe–C, 0,04...4,83 % C, тривалість, солідус, кінетика.

Вступ

Процеси твердіння, утворення усадкових дефектів в злитках і виливках отримали кількісну оцінку у вигляді математичних залежностей [1, 2], аналітичних рівнянь [3–6] і моделювання за допомогою комп'ютерних програм [7]. На практиці для розрахунку часу затвердіння виливка в першому наближенні використовують рівняння квадратного кореня:

$$\tau = R^2/k^2, \quad (1)$$

де k – коефіцієнт твердіння; R – половина товщини плаского виливка.

При охолодженні у кокілі виливків зі сталі значення коефіцієнта твердіння при-

ймають 0,30–0,35 см/с^{0,5} [8], а зміну вмісту вуглецю – від 0 до 2 %, тривалість твердіння не враховують. Для чавунних виливків коефіцієнт твердіння приймають 0,25–0,30 см/с^{0,5} і також не враховують вплив вмісту вуглецю на коефіцієнт твердіння. Тому розрахунок за формулу (1) треба використовувати як перше наближення до реального значення.

Багато аналітичних розрахунків охолодження виливків в кокільній і піщаній формі за А. І. Вейником [5], М. І. Хворіновим [2], Стефаном-Шварцом [4], методом інтегрального теплового балансу, визначення глибини прогріву ливарної форми за прийнятим законом розподілу температури [6] – приблизні і не є зручними в умовах виробництва.

Сучасні програми комп'ютерного моделювання процесів затвердіння не можуть врахувати всіх особливостей теплофізичних процесів, що відбуваються при твердінні в ливарній формі, навколишньому середовищу і на їх межах. Особливо це стосується металевих форм. При заливанні металу в кокіл через певний проміжок часу утворюється повітряний зазор між затверділим шаром металу і кокілем, в якому змінюються умови теплопередачі, ступінь чорноти поверхні, кокіл розширюється при нагріванні, а розміри виливка зменшуються через усадку металу.

Крім того, усадка залежить не тільки від хімічного складу, а також від макро- і мікроструктури. Наприклад, у чавунних прокатних валках з вибіленим робочим шаром щільність металу 7,60–7,65 г/см³, а у центральній частині кристалізується сірий чавун, щільність якого $\approx 7,2$ г/см³ [8]. Зміну теплофізичних коефіцієнтів в інтервалі температур твердіння, конвективні потоки по висоті виливка і від рідкої фази до металу, що кристалізується, фільтрацію рідкої фази через дендрити для живлення усадки можна оцінити тільки приблизно. Тому результати комп'ютерного моделювання необхідно порівнювати з експериментальними дослідженнями затвердіння найбільш характерних виливків для заданого хімічного складу, створювати еталонну модель затвердіння конкретного виливка, що дозволить поширити результати моделювання на різні типорозміри виливків.

Збіг результатів розрахунку і експерименту досягають корегуванням теплофізичних коефіцієнтів твердіння залежно від температури в процесі охолодження металу виливка: теплоємності, теплопровідності, густини, ступені чорноти поверхні, прихованої теплоти кристалізації, конвекції, враховувати зміну повітряного зазору між затверділим шаром металу і кокілем в результаті усадки та інших факторів. Теплообмін ливарної форми з навколишнім середовищем також обумовлює необхідність змінювати теплофізичні коефіцієнти. Тому експериментальні дослідження процесів затвердіння виливків різних хімічних складів є базовими для адаптації математичних моделей і отримання достовірних розрахунків. Але такі експериментальні дослідження виконані тільки для окремих видів Fe–C сплавів, що обумовлено трудомісткістю їх проведення. Для більшості хімічних складів кінетика процесу твердіння залишається невизначеною.

Мета роботи – оцифрування експериментальних термографічних вимірів процесів твердіння в кокілі циліндричних виливків із залізовуглецевих сплавів, їх інтерполяція для діапазону вмісту вуглецю 0,1...4,83 % і розробка графоаналітичної методики побудови кінетики просування фронту ізосолідус.

Методика роботи. У роботі використовували результати дев'яти експериментальних досліджень затвердіння Fe–C сплавів в кокілі циліндричних виливків з вмістом 0,1%С та 0,4%С (рис. 1), 0,04%С, 0,93%С, 1,42%С; 2,44% С, 3,28%С; 4,45%С, 4,83%С [6, 1960]. В роботах Б. Б. Гуляєва, О. Н. Магницького, Л. М. Постнова та ін. результати досліджень представлено кінетичними кривими твердіння ліквідус, виливання рідкого залишку металу та солідус в координатах x/R і τ/R^2 , де x – товщина шару металу, що затвердів; R – радіус виливка; τ – час твердіння. Таку методику обробки результатів експериментальних температурних вимірів процесу твердіння вперше розробив Б. Б. Гуляєв [1], а потім її використовували чеські вчені наукової школи

М. І. Хворінова [2], в СРСР В. В. Назаратін, П. Ф. Василевський [9] і на кафедрі ливарного виробництва НМетАУ [10]. Товщина чавунного кокілю або виливниці при виробництві злитків і прокатних валків циліндричної форми приймається всіма дослідниками за формулою, що наведена у відомому довіднику Н. Г. Гіршовича [11].

Для вилівку з 0,1%С (див. рис. 1) фронт затвердіння солідус встановлювали оцифровкою кривих за допомогою програми AutoCAD 2010. Так, на осі вилівку ($x/R = 1$) затвердіє 100 % твердої фази при значенні:

$$\tau/R^2 = 126 \cdot 10^{-3} \text{ хв/см}^2.$$

Тому тривалість твердіння вилівка – солідус $\tau_{S(0,1C)}$ [хв], можливо розрахувати за:

$$\tau_{S(0,1C)} = 0,126 \cdot R^2, \quad (1)$$

де R – радіус циліндричного вилівка, см.

При вмісті вуглецю 0,4 % тривалість твердіння 100 % твердої фази розраховували по (2), але для інших інтервалів хімічних складів сплавів такі дані відсутні.

$$\tau_{S(0,4C)} = 105 \cdot 10^{-3} \cdot R^2. \quad (2)$$

Тому результати дев'яти експериментальних вимірів температури кристалізації 100 % твердої фази [6] оцифровували з кроком 0,05 x/R з метою визначення параметричного критерію Б. Б. Гуляєва. Для прикладу на рис. 2 наведено схему знаходження критерію τ/R^2 за відносною товщиною затверділого шару металу x/R для сплаву з 0,4%С.

Результати та їх обговорення. За методикою, що наведена вище, оброблено всі графіки дев'яти експериментальних термографічних досліджень кінетики кристалізації 100 % твердої фази, а результати зведено в таблицю Excel. Результати оцифрування сплавів системи залізо–вуглець інтерполювали в діапазоні хімічних складів 0,04...4,83%С (рис. 3) і отримали 20 кривих із кроком відносної товщини затверділого шару металу 0,05 x/R – від найменшого до центру циліндричного вилівка $x/R = 1$.

Отримані результати можливо використовувати для розрахунку тривалості кристалізації вилівоків різних розмірів, хімічних складів, встановлювати мінімальний час, з якого безпечно переміщувати виливницю зі злитком з кесону до ділянки охолодження вилівоків та реалізації технології гарячого посаду у термopічі.

Наприклад, для циліндричного злитку з Fe–0,3%С час просування фронту кристалізації ізолідусу (τ_s , хв) до центру розраховували за формулою 3. При радіусі злитка $R = 22,5$ см остання частина рідкої фази затвердіє за 54,4 хв.

$$\tau_{S(0,3C)} = 107,5 \cdot 10^{-3} \cdot R^2. \quad (3)$$

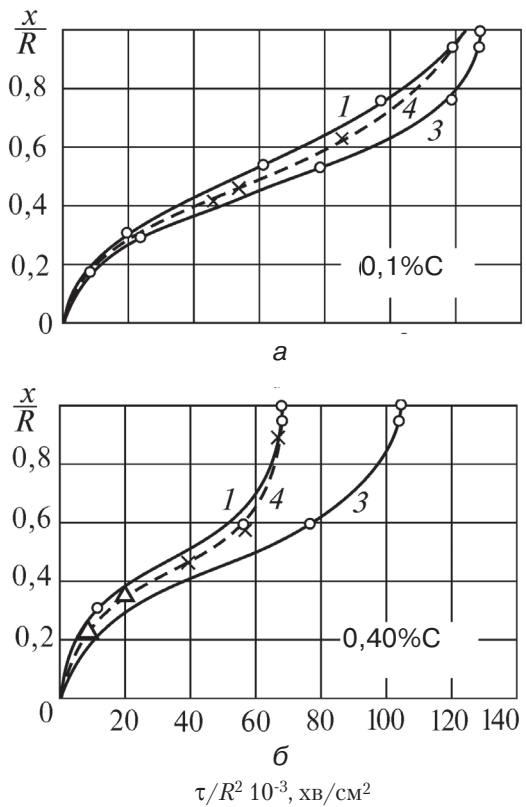


Рис. 1. Кінетика просування фронту кристалізації вилівоків з Fe–С сплавів з вмістом вуглецю 0,1 % (а) та 0,4 % (б) при охолодженні у циліндричному кокілі [6]: 1 – ліквідус; 3 – солідус. 4 – границя виливання

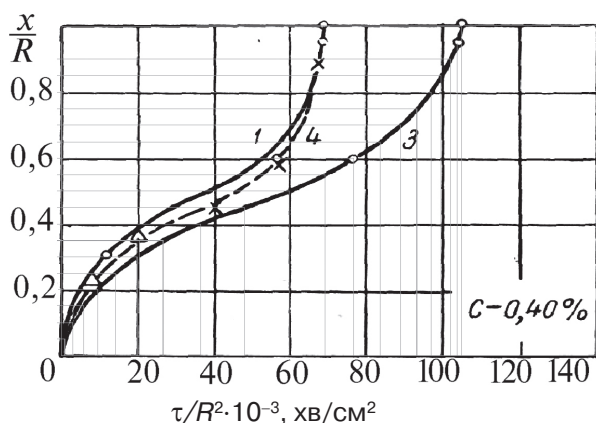


Рис. 2. Схема оцифрування значень параметричного критерію Б. Б. Гуляєва (τ/R^2 , хв/см²) з кроком $x/R=0,05$ по кінетичній кривій просування фронту солідус у циліндричному виливку з 0,4 % С, що охолоджується у чавунній виливниці

Крім того, отримані криві (рис. 3) просування фронту твердіння 100 % твердої фази для сплавів Fe–C дозволяють реалізувати виробництво біметалевого злитка за технологією у якій: після кристалізації заданого робочого шару металу необхідно вводити модифікатор, розкислювач або феросплав в центральну частину виливка, яка ще не затверділа. Наприклад, для розрахунку часу твердіння робочого шару циліндричного злитка з вмістом вуглецю 0,3%С, що охолоджується у чавунній виливниці, строїли кінетику просування фронту кристалізації (рис. 4).

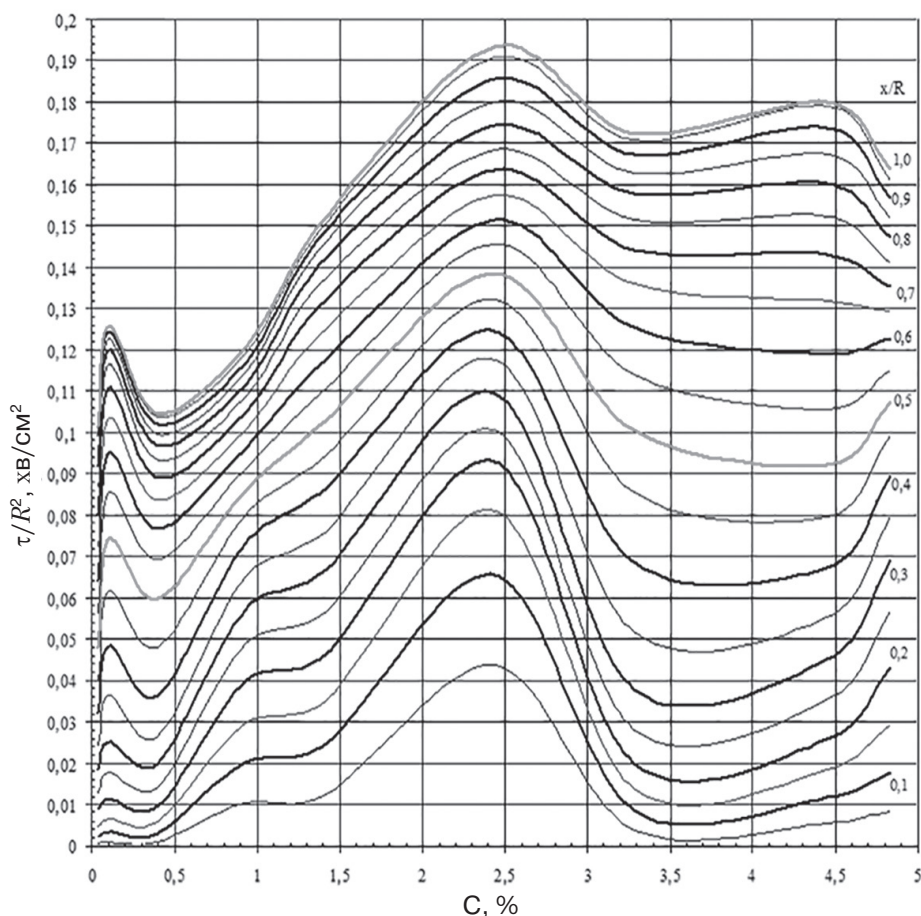


Рис. 3. Вплив вмісту вуглецю на параметричний критерій Б. Б. Гуляєва (τ/R^2) при твердінні в коклі 100 % твердої фази в циліндричних виливках із залізовуглецевих сплавів в діапазоні 0,04...4,83%С при кроці 0,05 x/R товщини затверділого шару металу

Для порівняння тривалості затвердіння виливків, що мають форму кулі, циліндра і плити, М. І. Хворіновим прийнято поняття приведеної товщини [2]. Воно базується на результатах обробки експериментальних досліджень, а за допомогою середньої константи затвердіння можливо розрахувати тривалість затвердіння виливків різної форми, якщо у розрахунок ввести значення приведеної товщини виливку $R = V/P$, де V – об'єм виливка; P – поверхня виливка. Тоді співвідношення тривалості твердіння виливків форми плити, циліндра і кулі в однакових ливарних формах складе:

$$\tau_{\Pi} : \tau_{\text{ц}} : \tau_{\text{к}} = 1 : 0,25 : 0,11 \quad (4)$$

Таким чином, за допомогою отриманих результатів (див. рис. 3) можливо розрахувати у першому наближенні тривалість кристалізації виливків, що мають форму, наприклад, кулі, які використовують в барабаних млинах для подрібнення руди, клінкеру, вугілля та інших матеріалів. Це дозволить уточнити час розкриття кокілю і скоротити цикл виготовлення виливків.

Для практичного використання розробленої методики наведено розрахунок часу введення алюмінію в осьову зону виливка діаметром 1000 мм після затвердіння 225 мм робочого шару залізовуглецевого сплаву з 0,3%С.

Відносна товщина затверділого шару металу дорівнює:

$$x/R = 225/500 = 0,45.$$

За даними, які наведено на рис. 4, для $x/R = 0,45$ сплаву з 0,3%С значення параметричного критерію τ/R^2 дорівнює $\approx 0,05$ хв/см². Тому тривалість затвердіння шару металу завтовшки 22,5 см у виливку $R = 50$ см, становить:

$$\tau = 0,05 \cdot R^2 = 0,05 \cdot 50^2 = 125 \text{ хв.}$$

Діаметр центральної частини виливка, яка не затверділа, дорівнює 550 мм, що дозволяє розрахувати масу рідкого металу, а потім визначити кількість алюмінію, який необхідно ввести для розкислення залишків розплаву.

Також за розробленою методикою можливо встановити, наприклад, товщину затверділого шару металу через 180 хв після заливання сплаву з 0,3%С у циліндричну чавунну виливницю діаметром 1000 мм.

Значення критерію τ/R^2 дорівнює:

$$\tau/R^2 = 180 \text{ хв} / (50 \text{ см})^2 = 0,072 \text{ хв/см}^2.$$

Від осі ординат (див. рис. 4) проводимо пряму до перетину з кривою і перпендикуляр до осі абсцис. Відносна товщина затверділого шару металу складе $\approx 0,55$ x/R . Тоді при радіусі виливка 500 мм товщина шару металу, на яку просунеться межа солідус, дорівнює:

$$x = R \cdot 0,55 = 500 \cdot 0,55 = 275 \text{ мм.}$$

Таким чином, товщина затверділого шару металу у виливку $\varnothing 1000$ мм через три

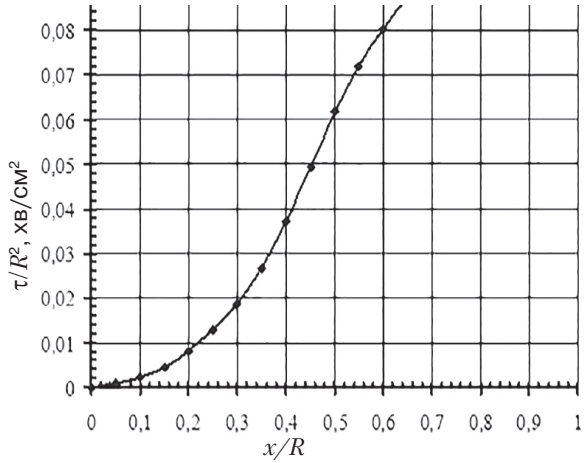


Рис. 4. Кінетика просування фронту кристалізації солідусу у циліндричному виливку зі сплаву Fe–0,3%С, що охолоджується у чавунній виливниці: τ – час, хв; R – радіус, см; x – товщина шару металу, що затвердів

години складе ≈ 275 мм, а частина металу, яка не затверділа і знаходиться у центрі виливка, має $\varnothing 450$ мм. Крім того, ці дані дозволять також реалізувати технологію, наприклад, газодинамічного тиску на рідкий залишок металу осьової зони виливка [12].

Висновки

- Відомі аналітичні розрахунки твердіння і охолодження виливків лише приблизно дозволяють встановити тривалість кристалізації, а експериментальні термографічні дослідження виконано тільки для окремих видів Fe–C сплавів, що обумовлено трудомісткістю їх проведення. Для більшості хімічних складів кінетика процесу твердіння залишається невизначеною.

- Результати дев'яти експериментальних досліджень процесів твердіння сплавів Fe–C, виконані Б. Б. Гуляєвим, О. Н. Магницьким, Л. М. Постновим та ін. оцифрували за допомогою програми AutoCAD 2010 з кроком $0,05 x/R$ з метою визначення відносного часу твердіння циліндричних виливків за параметричним критерієм τ/R^2 . Результати оцифровки вводили в таблицю Excel і інтерполювали в діапазоні складів 0,04...4,83%С.

- За отриманим масивом даних побудовано графік процесу просування фронту ізосолідус, який рекомендовано використовувати для оцінки точності комп'ютерного моделювання процесів затвердіння еталонних сплавів Fe–C і подальшого корегування теплофізичних коефіцієнтів в розрахунках.

- Наведено приклади розрахунку тривалості затвердіння в кокілі циліндричного виливку зі сплаву Fe–0,3%С. Отримані результати можливо використовувати для розрахунку тривалості кристалізації виливків різних розмірів, встановлювати мінімальний час, з якого безпечно переміщувати виливницю зі злитком з кесону до ділянки охолодження виливків та реалізації технології гарячого посаду у термічну піч. За допомогою розробленого графоаналітичного методу можливо розрахувати тривалість твердіння 100 % твердої фази, реалізовувати технологію модифікування і розкислення осьової зони виливків та газодинамічного тиску на метал в процесі кристалізації рідкої фази.

Список літератури

- Гуляев, Б. Б., (1950). Затвердевание и неоднородность стали. Москва-Ленинград: Металлургиздат, 227.
- Хворин, Н.И., (1958). Кристаллизация и неоднородность стали. Москва: перевод с чешского. Машгиз, 392.
- Куманин, И.Б., (1957). Об усадочной пористости в отливках. *Литейное производство*. №4, 20. 18-23.
- Раддл, Р.У., (1960). Затвердевание отливок. Москва: перевод с английского. Машгиз, 392.
- Вейник, А.И., (1960). Теория затвердевания отливок. Москва: Машгиз, 435.
- Гуляев, Б.Б., (1960). Литейные процессы. Москва-Ленинград: Машгиз, 416.
- Голод, В.М., Денисов В.А. (2007). Теория, компьютерный анализ и технология стального литья. Санкт-Петербург: ИПЦ СПГУТД, 610.
- Лейбензон, В.О., Пілюшенко, В.Л., Кондратенко, В.М., Хричиков, В.Є., Недопьокін, Ф.В., Білоусов, В.В. & Дмитрієв, Ю.В. (2009). Тверднення металів і металевих композицій. Київ: Наукова думка, 447.
- Назаратин, В.В., & Василевский, П.Ф., (1968). Экспериментальное исследование процесса затвердевания стальных отливок при различных условиях охлаждения. Москва: ЦНИИТ-МАШ, №183, 119. 111-121.
- Khrychikov, V. E., & Menyailo E. V. (2011). Temperature Patterns and Pouring Limits of High-Strength Cast Iron during Solidification in the Combined Chill-Sandy Mold Box. *Metallurgical and Mining Industry*, Vol. 3, № 2, 41. 39-43
- Гиршович, Н.Г., ред. (1978). Справочник по чугуному литью: коллек. моногр. Ленинград: Машиностроение, 758.

12. Селівьорстов, В.Ю., Хричиков, В.Є., Куцова, В.З., Меняйло, О.В. & Савега Д.О. (2009). Патент України на корисну модель № 46128 У 2009 06107. Спосіб отримання виливків. Заявл. 10.12.2009, опубл. 10.12.2009. Бюл. № 23.

Надійшла 15.03.2021

References

1. Ghuljaev, B.B., (1950). *Zatverdevanye y neodnorodnostj staly*. Moskva-Lenynghrad: Metal-lurghyzdat, 227.
2. Khvorynov, N.Y., (1958). *Krystallyzacyja y neodnorodnostj staly*. Moskva: perevod s cheshskogho. Mashghyz, 392.
3. Kumanyn, Y.B., (1957). *Ob usadochnoj porystosty v otlvykakh. Lytejnoe proyzvodstvo*. No. 4, 20. 18-23.
4. Raddl, R.U., (1960). *Zatverdevanye otlvyok*. Moskva: perevod s anghlyjskogho. Mashghyz, 392.
5. Vejnyk, A.Y., (1960). *Teoryja zatverdevanyja otlvyok*. Moskva: Mashghyz, 435.
6. Ghuljaev, B.B., (1960). *Lytejnye processy*. Moskva-Lenynghrad: Mashghyz, 416.
7. Gholod, V.M., Denysov V.A. (2007). *Teoryja, kompjjuternyj analiz y tekhnologhyja staljnogho lytjja*. Sankt-Peterburgh: YPC SPGhUTD, 610.
8. Lejbenzon, V.O., Piljushenko, V.L., Kondratenko, V.M., Khrychikov, V.Je., Nedopjokin, F.V., Bilousov, V.V. & Dmytrijev, Ju.V. (2009). *Tverdnennja metaliv i metalevykh kompozycji*. Kyjiv: Naukova dumka, 447.
9. Nazaraty, V.V., & Vasylevskij, P.F., (1968). *Экспериментальное yssledovanye processa zatverdevanyja staljnykh otlvyok pry razlychnykh uslovyakh okhlazhdenija*. Moskva: CNYTMASh, №183, 119. 111-121.
10. Khrychikov, V. E., & Menyailo E. V. (2011). Temperature Patterns and Pouring Limits of High-Strength Cast Iron during Solidification in the Combined Chill-Sandy Mold Box. *Metallurgical and Mining Industry*, Vol. 3, no. 2, 41. 39–43.
11. Ghyrshovych, N.Gh., red. (1978). *Spravochnyk po chughunnomu lytiju: kollek. monoghr*. Lenynghrad: Mashynostroenye, 758.
12. Selivjorstov, V.Ju., Khrychikov, V.Je., Kucova, V.Z., Menajlo, O.V. & Savegha D.O. (2009). Patent Ukrainy na korysnu modelj №46128 У 2009 06107. Sposib otrymannja vylyvkiv. Zajavl. 10.12.2009, opubl. 10.12.2009. Bjul. № 23.

Received 21.03.2021

A. D. Semenov, *Postgraduate; e-mail: aldmsem@gmail.com*

V. E. Khrychikov, *Dr. Sci. (Engin.), Leading Research Scientist, e-mail: litpro.kaf@gmail.com,*

V. Z. Kutsova, *Dr. Sci. (Engin.), Leading Research Scientist,*

H. V. Menailo, *Dr. Sci. (Engin.), Assistant Professor*

National Metallurgical Academy of Ukraine (Dnipro, Ukraine)

CALCULATION OF THE KINETICS OF THE CRYSTALLIZATION FRONT OF IRON-CARBON ALLOYS IN MOLD CYLINDRICAL FORMS

The aim of the work is to digitize experimental thermographic studies of solidification processes in the chill mold of cylindrical castings made of iron-carbon alloys, their interpolation in the range of carbon content 0.1...4.83 % and the development of a graphic-analytical technique for constructing the kinetics of the advance of the isosolidus front. Modern analytical calculations of solidification and cooling of castings by the method of integral heat balance, Stefan-Schwartz, A. I. Veinik, N. I. Khvorinov does not allow to establish the influence of the chemical composition of the alloy, the air gap between the solidified metal layer and the chill mold, the degree of surface blackness, the expansion of the chill mold upon heating, shrinkage of the casting metal and the dependence of the thermophysical coefficients on temperature. Computer simulation programs

for solidification processes increase the accuracy of calculations only if they are adapted to the results of experimental measurements of solidification temperatures of castings with a specific chemical composition. In this work, the results of nine experimental studies of the solidification processes of cylindrical castings from Fe–C alloys obtained by B. B. Gulyaev, O. N. Magnitsky, L. M. Postnov in the coordinates of the parametric criterion (τ/R^2) and the relative thickness (x/R) of the solidified metal layer (x). The obtained dependences of crystallization of 100 % solid phase with a step of $0.05 x/R$ were interpolated in the range of carbon content 0.04 ... 4.83 %. Examples of calculating the solidification duration of cylindrical castings in a chill mold are given, and according to the hypothesis of the reduced thickness of N.I. Khvorinov, it is possible to establish in a first approximation the duration of solidification of castings in the form of a ball and plate. The obtained results are recommended to be used to assess the accuracy of computer modeling of the solidification processes of the reference Fe–C alloys and to further correct the thermophysical coefficients adopted in the calculations. The kinetics of the advance of the isosolidus front is constructed for the Fe–0.3 % C alloy, which is cooled in a cylindrical mold, and its total solidification duration is calculated. Using the graphs in the coordinates τ / R^2 and x/R , it is possible to calculate the duration of crystallization of castings of various sizes, the minimum time for safe movement of the mold with the ingot from the caisson to the casting cooling section to perform the technology of hot fit of the ingot into a thermal furnace, implement the technology of influencing liquid metal in the foundry form or gas-dynamic pressure during crystallization of the liquid phase.

Keywords: casting, cylinder, solidification, Fe–C, 0.04...4.83% C, duration, solidus, kinetics.