

УДК 621.74

<https://doi.org/10.34185/tpm.6.2021.06>

Білий О.П., Солоненко Л.І., Осипенко І.О., Усенко Р.В., Реп'ях С.І., Хричиков В.Є.
Дослідження умов утворення усадкової раковини в нижній шийці
прокатних валків виконання СПХН-60

Bilyi O.P., Solonenko L.I., Osipenko I.O., Usenko R.V., Repyakh S.I., Khrychikov V.E.
Investigation of closed cavity conditions in the bottom of cast rolls
СПХН-60

В роботі досліджена можливість попередження виникнення усадкових раковин закритого типу в нижніх шийках чавунних прокатних валків виконання СПХН-60 за рахунок зміни теплофізичних та розмірних параметрів елементів комбінованої ливарної форми, яку на сьогодні використовують в ливарних цехах.

Дослідження виконано за результатами термографування реальних валків виконання СПХН-60, адаптування отриманих даних та комп'ютерного моделювання процесу затвердіння чавунних валків в комбінованій кокільно-піщаній формі, а також вперше розробленого параметричного критерію послідовного затвердіння в системі нижня шийка валку та його бочки.

Встановлено закономірності комплексного впливу діаметрів бочки і нижніх шийок валків, розмірів і теплофізичних параметрів матеріалів комбінованої форми на послідовність затвердіння даних елементів виливка. Отримані дані свідчать про те, що підвищення рівня теплофізичних властивостей формувальної суміші для нижньої шийки валка в межах використання відомих на сьогодні вогнетривких неметалевих матеріалів не дозволяє попередити виникнення усадкової раковини в нижній шийці валків виконання СПХН-60. Підвищення рівня теплоакumuлюючої здатності формувальної суміші для нижньої шийки валка до $10000 \text{ Вт} \cdot \text{с}^{0.5} / (\text{м}^2 \cdot \text{град})$ дозволить попередити виникнення усадкової раковини в нижній шийці валків виконання СПХН-60, але не є доцільним у зв'язку з появою шару вибіленого чавуну в нижній шийці, що неприпустимо для будь-якого прокатного валку. Для вирішення даної задачі рекомендовано для валків виконання СПХН-60 використовувати екранування валкової комбінованої форми в певний момент часу затвердіння розплаву в бочці.

Мета роботи – дослідити можливість попередження виникнення усадкових раковин закритого типу в нижніх шийках прокатних валків за рахунок змін теплофізичних параметрів їх формувальних сумішей.

Методика. В роботі використано метод термографування та комп'ютерного моделювання за програмою LVMFlow.

Наукова новизна. Вперше встановлено закономірності комплексного впливу теплофізичних та розмірних параметрів елементів комбінованої ливарної форми на виникнення усадкової раковини в нижній шийці прокатних валків виконання СПХН-60.

Практична значущість. Використання результатів досліджень дозволить скоротити час та витрати на технологічні зміни виготовлення прокатних валків виконання СПХН-60 з метою попередження виникнення в їх нижніх шийках усадкових раковин шляхом зміни використовуваних формувальних матеріалів та розмірів конструктивних елементів комбінованої ливарної форми.

Ключові слова: прокатний валок, кокіль, суміш, усадкова раковина, затвердіння, чавун, виливок

The paper investigates the possibility of preventing the occurrence of closed-type shrinkage shells in the lower necks of СПХН-60 iron rolling rolls by changing the thermophysical and dimensional parameters of the elements of the combined foundry mold, which is currently used in foundries.

The research was carried out based on the results of thermography of real rolls of СПХН-60, adaptation of the obtained data and computer modeling of the process of hardening of cast iron rolls in the combined casting-sand mold, as well as the first developed parametric criterion of sequential hardening in the system of the lower neck of the roll and its barrel.

The regularities of the complex influence of the diameters of the barrel and the lower necks of the rolls, the sizes and thermophysical parameters of the materials of the combined form on the sequence of solidification of these casting elements have been established. The obtained data indicate that increasing the level of thermophysical properties of the molding mixture for the lower neck of the roll within the limits of the use of currently known refractory non-metallic materials does not prevent the occurrence of a shrinkage shell in the lower neck of the rolls of СПХН-60 execution. Increasing the level of the heat-accumulating capacity of the forming mixture for the lower neck of the roll to $10000 \text{ W} \cdot \text{s}^{0.5} / (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ will prevent the occurrence of a shrinkage shell in the lower neck of the rolls of СПХН-60 performance, but it is not expedient due to the appearance of a layer of bleached iron in the lower neck, which is unacceptable for any rolling mill.

To solve this problem, it is recommended for СПХН-60 rolls to use shielding of the roll combined form at a certain moment of solidification of the melt in the barrel.

Purpose of the work is to investigate the possibility of preventing the occurrence of closed-type shrinkage shells in the lower necks of rolling rolls due to changes in the thermophysical parameters of their forming mixtures.

Methodology. The work uses the method of thermography and computer modeling using the LVMFlow program.

Originality. For the first time, the regularities of the complex influence of thermophysical and dimensional parameters of the elements of the combined foundry mold on the occurrence of a shrinkage shell in the lower neck of the СПХН-60 rolling rolls were established.

Білий Олександр Петрович – к.т.н., доц. УДУНТ,
Солоненко Людмила Ігорівна – к.т.н., доц. УДУНТ,
Осипенко Ірина Олександрівна – к.т.н., доц. УДУНТ,
Усенко Руслан Вікторович – к.т.н., доц. УДУНТ,
Реп'ях Сергій Іванович – д.т.н., с.д. УДУНТ,
Хричиков Валерій Євгенович – д.т.н., проф. УДУНТ.

Bily Oleksandr – c.t.s., Assoc. USUST
Lyudmila Solonenko – c.t.s., Assoc. USUST
Iryna Osypenko – c.t.s., Assoc. USUST
Ruslan Usenko – c.t.s., Assoc. USUST
Serhiy Repyakh – d.t.s., USUST
Valery Khrychikov – d.t.s., Prof. USUST

Practical value. The use of the research results will allow to reduce the time and costs for technological changes in the production of СПХН-60 rolling rolls in order to prevent the occurrence of shrinkage shells in their lower necks by changing the used forming materials and the dimensions of the structural elements of the combined foundry mold.

Key words: rolling roll, mold, mixture, shrink shell, solidification, cast iron, casting

Вступ. При виготовленні вибілених валків, бочка яких формується в забарвленому вогнетривкою фарбою кокіллі, раковини і пухкості, як правило, виникають в тих випадках, коли при заливці надливна частина форми виявляється не повністю заповненою або її об'єм не відповідає розмірам валка. У разі виробництва дрібних і середніх за масою вибілених валків з короткою бочкою (до 1200 мм) і відносно товстою шийкою, надлив, як правило, заповнюють повністю. Для успішної роботи надливу в таких випадках надливу надставку просушують і заздалегідь нагрівають до температури не менше 80 °С. У міру твердіння чавуну у формі у ряді випадків надливу надставку доливають добре перегрітим чавуном.

Надлив великотоннажних валків, як правило, доливають перегрітим первинним чавуном вже через 20 хв після закінчення заливки, а надалі ще 2...4 рази через кожні 30...40 хв до повного твердіння розплаву в надливі. Після кожної доливки дзеркало розплаву в надливі утеплюють вогнетривким матеріалом утеплювача. На деяких підприємствах замість утеплювача практикують електрообігрів надливу.

Для валків з шийками, які вирізують з бочки по закінченні заливки форми надлив надалі не доливають, щоб уникнути заклинювання виливка у формі в результаті попадання розплаву в проміжок

між стінкою кокілю і валка. Проте, надлив таких валків утеплюють деревним вугіллем, що попереджує попадання в проміжок між валком і кокілем фосфідної евтектики, яка вичавлюється з серцевини надливу в процесі лінійної усадки матеріалу валка.

Проте, не дивлячись на різноманітність вживаних способів і матеріалів валків, що забезпечують достатнє живлення, проблема виникнення усадкової раковини у сполученні нижньої шийки і бочки на сьогодні залишається не вирішеною, оскільки усі наведені вище заходи спрямовані лише на попередження виникнення усадкових дефектів в бочці і верхній шийці валка.

Аналіз літературних даних. Причиною утворення будь-якого усадкового дефекту є припинення живлення фронту кристалізації від об'ємів рідкого металу, що сполучаються з цим елементом виливка. Тому для отримання виливка без усадкової раковини і пухкості повинна виконуватися умова послідовності твердіння усіх суміжних елементів виливка від його нижнього до верхнього елементу і надливу на ньому [1...3].

Стосовно сортопрокатних валків, що виготовляють в комбінованих ливарних формах, етапи виникнення усадкових раковин сполучень нижньої шийки з бочкою валка можна пояснити схемою на рис. 1.

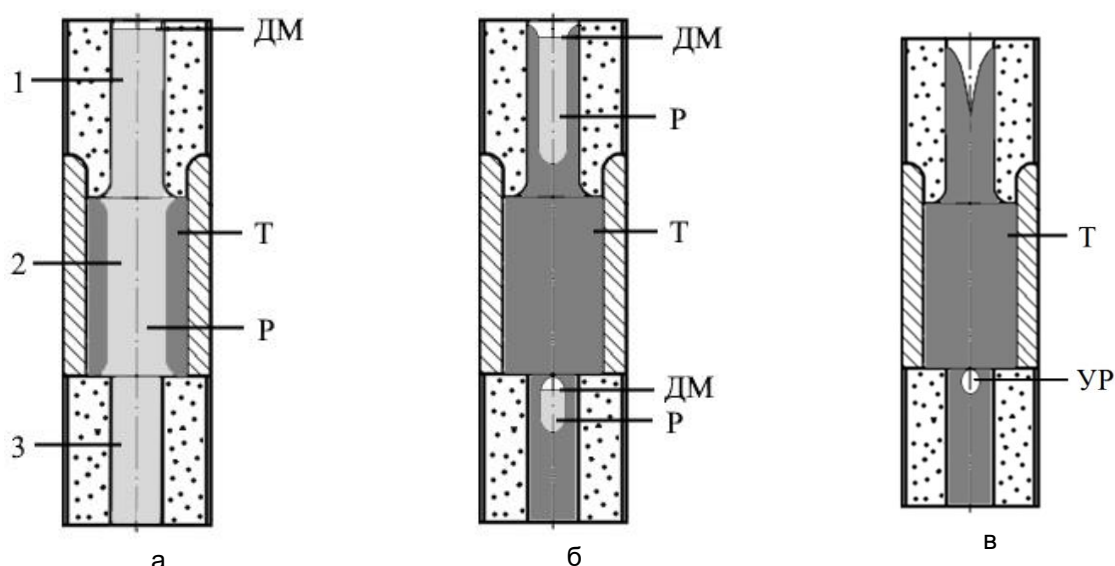


Рисунок 1. Схеми етапів виникнення усадкової раковини закритого типу в нижній шийці сортопрокатного валка: 1 – верхня шийка валка; 2 – бочка валка; 3 – нижня шийка валка; ДМ – дзеркало металу; Р – розплав; Т – тверда фаза; УР – усадкова раковина; а – вихідний стан; б – утворення термічних вузлів; в – утворення усадкової раковини

Відповідно до рис. 1, а, перший етап твердіння сортопрокатного валка у ливарній формі характеризується інтенсивним ростом твердої фази по периметру бочки. Це обумовлено тим, що даний

елемент валка оформлений чавунним кокілем – матеріалом з дуже великим коефіцієнтом теплоакumuлюючої здатності. При цьому інтенсивність твердіння чавуну в бочці валка така велика, що

етап його твердіння завершується раніше ніж час твердіння чавуну в шийках валка, що відповідає схемі на рис. 1, б.

В момент завершення твердіння чавуну в бочці у шийках валку виникають термічні вузли. Причиною цього є знижена інтенсивність тепловідводу від розплаву чавуну в шийках до ливарної форми, елементи якої виготовлені з піщаної суміші. Тобто відмінність в діаметрах бочки і шийок в даному випадку була знівельована різницею у величині коефіцієнтів теплоакумуючої здатності елементів комбінованої ливарної форми. При цьому, в такий момент часу розплав нижньої шийки перестає житися від надлива через верхню шийку та бочку, а розплав верхньої шийки продовжує житися від надлива, який розташований в її верхній частині. Як результат нестача живлення розплаву нижньої шийки під час затвердіння призводить до виникнення усадкової раковини в області її сполучення з бочкою, про що свідчить схема на рис. 1, в. Тобто, за цієї конструкції і умов охолодження розплаву у формі по відношенню до нижньої шийки не виконується умова послідовного твердіння елементів валка.

Нині існує велика кількість способів попередження виникнення усадкових раковин в виливках, у числі яких – зміна конструкції виливка [4], утеплення надливу [5], електрошлаковий обігрів надливу [6,7], використання ливарної форми з різною величиною теплоакумуючої здатності по її висоті, збільшення розмірів надливів, встановлення холодильників на термічних вузлах, розширення інтервалу кристалізації сплаву [3, 8], введення металевих порошків і дроту в розплав, вібрація розплаву [9, 10] тощо.

З точки зору попередження виникнення закритих усадкових раковин у валках найбільш прийнятним є корегування теплофізичних властивостей формувальних матеріалів їх комбінованих ливарних форм. Тобто, відповідно до комбінованої форми, послідовність твердіння чавуну від нижньої шийки до надливу можливо підвищити шляхом зменшення теплоакумуючої здатності матеріалу кокілю, або шляхом підвищення термічного опору кокілю (нанесенням вогнетривкої фарби на внутрішню поверхню кокілю, створенням повітряного зазору між поверхнею виливка і кокілю, зниженням перепаду температур між внутрішньою і зовнішньою поверхнями стінок кокілю тощо). В той же час, в нижній шийці збільшити швидкість твердіння чавуну можливо лише шляхом збільшення теплоакумуючої здатності матеріалу форми.

Стосовно лиття сортопрокатних валків з числа можливих способів дії і управління швидкістю твердіння бочки і шийки найбільш прийнятними є способи управління термічним опором проміжку між виливком і кокілем. Зокрема, цей варіант управління процесом твердіння валків був реалізований авторами [11]. Недоліком цього технічного рішення є технічна складність його реалізації, починаючи з моменту заповнення проміжку розплавом рід-

кого алюмінію і до моменту його випуску з проміжку.

З викладеного вище витікає, що:

- робота, яка спрямована на дослідження можливостей попередження виникнення усадкових раковин закритого типу в нижніх шийках прокатних валків за рахунок змін теплофізичних параметрів їх формувальних сумішей, є актуальною;

- умовою попередження виникнення закритої усадочної раковини в нижній шийці валка є наступне співвідношення:

$$K_{400} = \frac{\tau_{s(б)}}{\tau_{s(н)}} \geq 1, \quad (1)$$

де $\tau_{s(б)}$, $\tau_{s(н)}$ – час затвердіння розплаву в бочці і нижній шийці валка відповідно.

При цьому, досягаючи виконання співвідношення (1) на практиці слід враховувати ще одну особливість прокатних валків – регламентування структури чавуну у всіх його елементах. Тобто, в шийках валків неприпустимі наявність вибіленого шару і усадкової раковини, в бочці повинен бути вибілений шар регламентованої товщини і серцевина з сірого чавуну. Виходячи з цього, технічне рішення щодо попередження виникнення усадочної раковини в нижній шийці має бути компромісним і забезпечити виконання вимог до якості валків в повному обсязі, тобто матеріал та розміри використовуваних на підприємствах кокілів змінювати неприпустимо.

Мета і завдання досліджень. Мета роботи – дослідити можливість попередження виникнення усадкових раковин закритого типу в нижніх шийках прокатних валків за рахунок змін теплофізичних параметрів їх формувальних сумішей. Задача досліджень – встановити можливість забезпечення формувальною сумішшю виконання умов послідовного затвердіння чавуну від нижньої шийки валка до бочки в комбінованій ливарній формі прокатних валків виконання СПХН-60.

Методика досліджень. Дослідження проводили на чавунному прокатному валку виконання СПХН-60 ТУ У 28.9-00187375-106:2018, який отримують шляхом заливки комбінованої ливарної форми.

Швидкість твердіння і охолодження чавуну у формі визначали за результатами розрахунку, використовуючи термограми, отримані в результаті виміру температури виливка.

Для виміру температури використовували хромель-алюмелеві датчики температури (ХА-термопари) в комплекті з потенціометром КСП-4 і вимірника температури типу ПерМик І8 8ТС/10К-[RS458] ИПИ(ИПК)-Щ на 8 каналів, що забезпечувало точність визначення температури з похибкою $\pm 12,5$ °С. Для вимірювань температури використовували ХА-термопари з діаметром електродів 0,5 мм без компенсаційних дрітків. Робочі спаї

термопар захищали кварцовими наконечниками, які розташовували відповідно до схеми рис. 2.

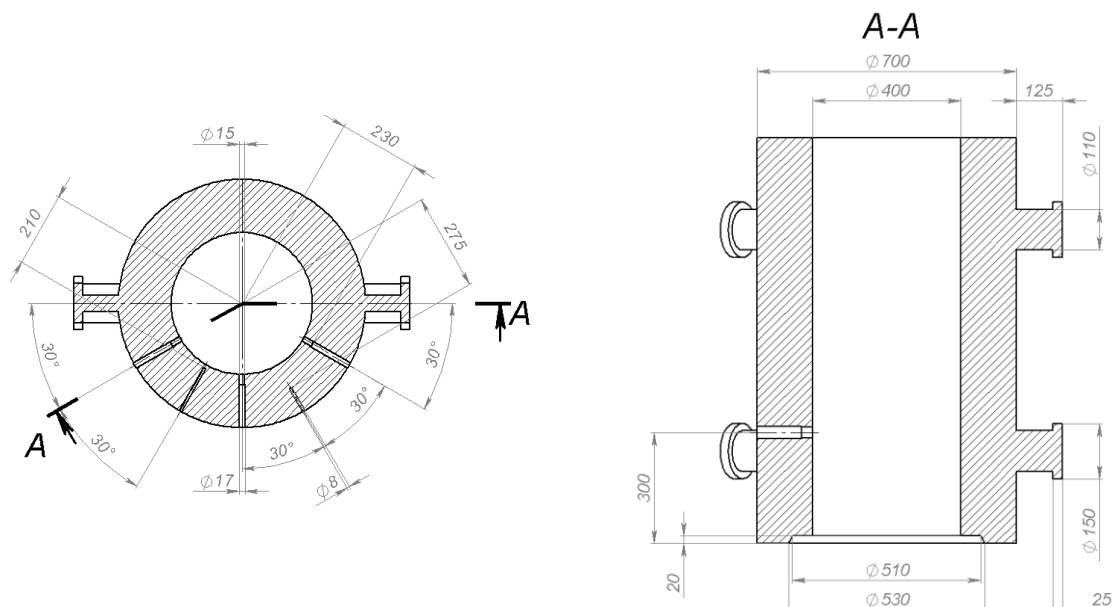


Рисунок 2– Схема розташування направляючих отворів у кокіль для введення термопар

Комп'ютерне моделювання процесу затвердіння та охолодження валків у комбінованій ливарній формі здійснювали в програмі LVMFlow v2.91 з використанням оцифрованих термограм [12, 13] для адаптації отриманих результатів до реальних даних.

Адаптацію комп'ютерної програми до конкретних умов виробництва виливків проводили шляхом порівняльності результатів комп'ютерного моделювання та експерименту. З цією метою, виходячи з умов розв'язуваної задачі, термографували реальний валок, реєструючи зміну його темпера-

тури в осьовій частині бочки. За отриманими даними визначали поправочний коефіцієнт в температурному інтервалі від температури заливки чавуну до його температури солідус.

Результати досліджень. Для встановлення закономірностей і умов виникнення усадкової раковини в нижній шийці валка використовували дані комп'ютерного моделювання, промислового експерименту і параметричного критерію K_{400} , складеного на основі аналізу існуючих аналітичних залежностей з використанням елементів теорії подібності, а також схеми валкана рис. 3.

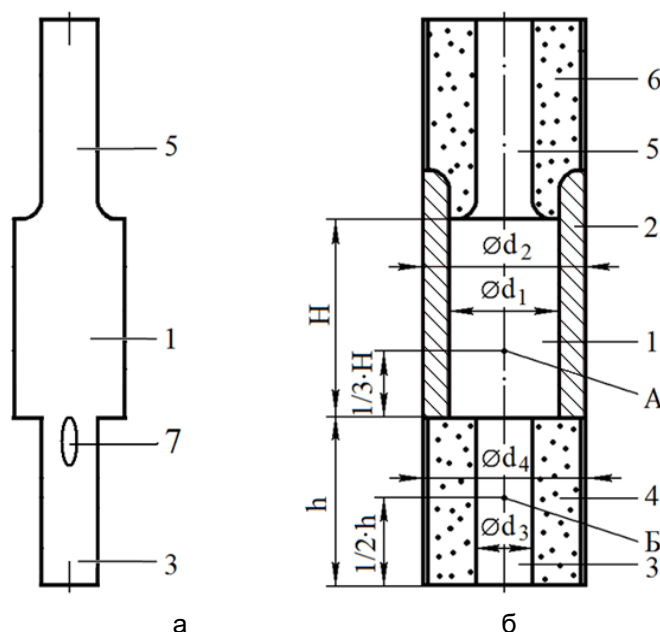


Рисунок 3.– Схема розташування усадкової раковини в нижній шийці валка (а) і основні елементи ливарної форми (б): 1 – бочка валка; 2 – кокіль; 3 – нижня шийка валка; 4 – форма нижній шийки; 5 – верхня шийка; 6 – форма верхній шийки; 7 – усадкова раковина

Відповідно до теорії затвердіння виливків прийнято вважати, що реально процес фільтраційного масопереносу розплаву до фронту затвердіння завершується при утриманні 30...60% за обсягом рідкої фази в області двофазного стану сплаву виливка [14...18]. Проте, для комп'ютерного розрахунку K_{400} (див. 4.1), в якості реперної крапки розрахунків, була прийнята температура солідус чавуну. Таке рішення обумовлене припущенням, відповідно до якого, з точки зору відносного часу досягнення прийнятої температури, їх відносні ве-

личини постійні для незмінних умов тепловідведення від виливка. У зв'язку з цим при проведенні комп'ютерного моделювання гарячі спай термодар розміщували відповідно до схеми (див. А, Б на рис. 3, б).

Для спрощення розрахунку, що було зазначено вище, був розроблений наступний параметричний критерій K_{400} , як співвідношення часу затвердіння чавуну в бочці (див. А на рис. 3, б) і в нижній шийці (див. Б на рис. 3, б):

$$K_{400} = f \cdot \left(\frac{b_2}{b_4} \right)^{0,2} \cdot \left(\frac{d_1}{d_3} \right)^{1,5} \cdot \frac{\left(\frac{b_4^2 \cdot d_4^2 \cdot d_3^2}{b_2^2} \right)^{0,2}}{\left(\frac{d_2^2}{d_1^2} - 0,75 \right)^{0,2}}, \quad (2)$$

де f – коефіцієнт пропорційності, що враховує інтенсивність тепловіддачі із зовнішнього боку форми ($f = 0,0038$); b_2, b_4 – коефіцієнти теплоакуючої здатності матеріалу кокілю і формувальної суміші для нижньої шийки валка при 400 °С, відповідно; d_1 – внутрішній діаметр кокілю бочки валка;

d_2 – зовнішній діаметр кокілю бочки валка; d_3 – внутрішній діаметр форми нижньої шийки валка; d_4 – зовнішній діаметр форми нижньої шийки валка.

$$b = \sqrt{\rho \cdot c \cdot \lambda}, \quad (3)$$

де ρ – щільність; c – питома теплоємність; λ – коефіцієнт теплопровідності.

Встановлено, що реальна температура в центрі валка при охолодженні чавуну від температури заливки до температури солідус за результатами комп'ютерного моделювання може бути розрахована за формулою:

$$t_p = t_k \cdot (1 - 0,0021 \cdot \tau + 0,00008 \cdot \tau^2), \quad (4)$$

де t_k – температура за результатами комп'ютерного моделювання, °С; τ – час охолодження виливка у формі, хв.

Результати експериментальних t_e , комп'ютерних t_k і розрахункових t_p значень за наведеною формулою (4), а також похибки між експериментальними і розрахунковими значеннями температур в осьовій частині валка наведені в табл. 1.

Таблиця 1
Результати визначення і розрахунку значень температур в осьовій частині валка

Час, хв	t_e , °С	t_k , °С	t_p , °С	$100(t_e - t_p) / t_e, \%$
5	1222	1230	1219,5	0,2
10	1220	1230	1214,0	0,5
20	1219	1220	1207,8	0,9
30	1206	1189	1199,7	0,5
40	1181	1135	1184,9	-0,3

Аналіз даних табл. 1 показує, що використання поправочного коефіцієнта дозволяє розраховувати величину температури в чавуну у вказаному вище інтервалі з похибкою не більше 1%. В зв'язку з цим формулу (4) використовували в подальших розрахунках при адаптації і інтерпретації результатів комп'ютерного моделювання.

Вихідні дані і результати розрахунків критерію K_{400} за рівнянням (2) і за програмою LVMFlow для форми нижньої шийки валка на основі кварцового

піску приведені в табл. 2, а для цирконієвого піску – в табл. 3.

Аналіз даних табл. 2 і 3 показує, що використання критерію K_{400} дозволяє з похибкою не більше 9% розраховувати співвідношення шуканих значень часу твердіння чавуну у валках виконання СПХН-60. Ця обставина дозволяє рекомендувати критерій K_{400} в якості показника технологічності валків виконання СПХН-60, що виготовляють в

комбінованих формах і мають вказані вище межі зміни своїх геометричних розмірів.

Таблиця 2

Вихідні дані і результати розрахунку K_{400} для форми нижньої шийки валка на основі кварцового піску

№ з/п	d_1 , мм	d_2 , мм	d_3 , мм	d_4 , мм	b_2	b_4	Розрахункові величини K_{400}		Δ , %
					Вт·с ^{0,5} /(м ² ·град)		рівняння (2)	LVM-Flow	
1	300	700	200	700	12850	990	0,35	0,35	+1,4
2	400	700	200	700	12850	990	0,62	0,62	+1,1
3	500	700	200	700	12850	990	0,99	1,03	-4,2
4	400	700	100	700	12850	990	1,33	1,23	+8,1
5	400	700	200	700	12850	990	0,62	0,62	+1,1
6	400	700	300	700	12850	990	0,40	0,45	-11,7
7	400	700	200	700	12850	990	0,62	0,62	+1,1
8	400	600	200	700	12850	990	0,68	0,64	+6,1
9	400	500	200	700	12850	990	0,77	0,77	-0,8

Примітка. Δ – відносна різниця між даними, розрахованими за рівнянням (2) і за програмою LVMFlow

Таблиця 3

Початкові дані і результати розрахунку K_{400} для форми нижньої шийки валка на основі цирконієвого піску

№ з/п	d_1 , мм	d_2 , мм	d_3 , мм	d_4 , мм	b_2	b_4	Розрахункові величини K_{400}		Δ , %
					Вт·с ^{0,5} /(м ² ·град)		рівняння (2)	LVM-Flow	
1	300	700	200	700	12850	1380	0,38	0,38	-0,9
2	400	700	200	700	12850	1380	0,67	0,68	-1,5
3	500	700	200	700	12850	1380	1,06	1,12	-5,8
4	400	700	100	700	12850	1380	1,43	1,51	-5,2
5	400	700	200	700	12850	1380	0,67	0,68	-1,5
6	400	700	300	700	12850	1380	0,43	0,47	-9,0
7	400	700	200	700	12850	1380	0,67	0,68	-1,5
8	400	600	200	700	12850	1380	0,73	0,70	3,6
9	400	500	200	700	12850	1380	0,82	0,84	-2,2

Примітка. Δ – відносна різниця між даними, розрахованими за рівнянням (2) і за програмою LVMFlow

Для валків виконання СПХН-60 залежності критерію K_{400} від зовнішнього діаметру кокілю при його зміні від 500 до 700 мм, діаметру бочки валка від 300 до 500 мм і діаметру нижньої шийки від 100 до 300 мм при використанні формувальної суміші на основі кварцового піску для форми ниж-

ньої шийки представлено на рис. 4, а на основі цирконієвого піску – на рис. 5.

Залежність критерію K_{400} від коефіцієнту тепло-акумуляуючої здатності формувальної суміші нижньої шийки валка представлена на рис. 6.

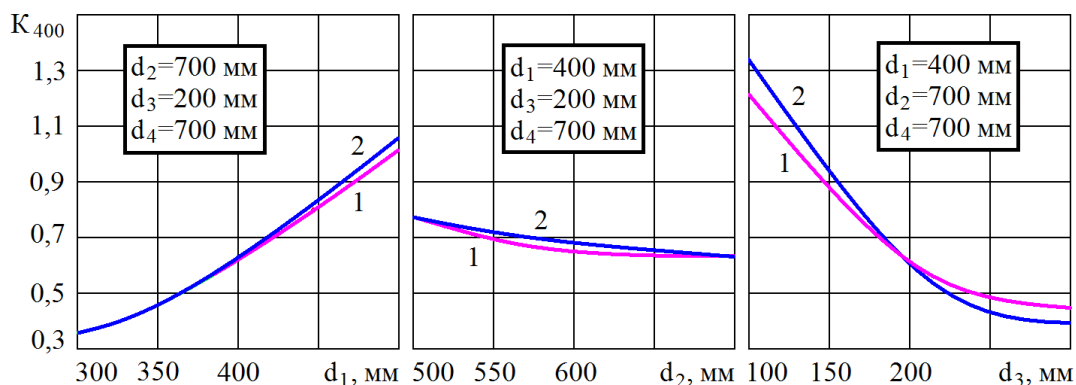


Рисунок 4. Залежність критерію K_{400} від зовнішнього діаметру кокілю (а), діаметру бочки валка (б) і діаметру нижньої шийки (в) при використанні формувальної суміші на основі кварцового піску для форми нижньої шийки: 1 – розрахунок за програмою LVMFlow; 2 – розрахунок за формулою (2)

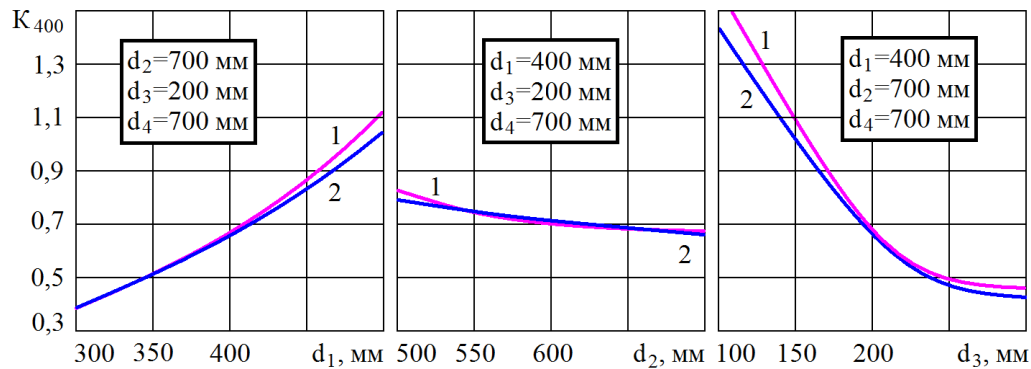


Рисунок 5. Залежність критерію K_{400} від зовнішнього діаметра кокілю (а), діаметра бочки валка (б) і діаметра нижньої шийки (в) при використанні формувальної суміші на основі цирконієвого піску для форми нижньої шийки: 1 – розрахунок за програмою LVMFlow; 2 – розрахунок за формулою (2)

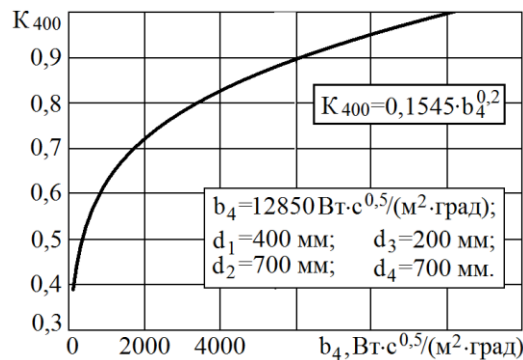


Рисунок 6. Залежність критерію K_{400} від коефіцієнту теплоакумуючої здатності формувальної суміші нижньої шийки валка

Аналіз зображень на рис. 4 та 5 показує, що результати комп'ютерного моделювання та розрахунків за критерієм K_{400} адекватно описують умови усадкових дефектів, що утворюються в нижній шийці.

Обговорення результатів. Аналіз ходу залежностей (рис. 4 і 5) показує, що зі збільшенням внутрішнього діаметра кокілю (бочки валка) коефіцієнт K_{400} збільшується в той час, як зміна товщини кокілю бочки валка не чинить істотного впливу на нього. Збільшення ж внутрішнього діаметру форми нижньої шийки валка негативно позначається на значенні коефіцієнта K_{400} , зменшуючи його величину. Заміна формувальної суміші на основі кварцового піску на формувальну суміш на основі цирконієвого піску привела (на суміш з вищою теплоакумуючою здатністю) до збільшення коефіцієнта K_{400} . Проте, цього збільшення виявляється недостатньо для попередження виникнення усадкової раковини в нижніх шийках валків виконання СПХН-60.

Таким чином, підвищення рівня теплофізичних властивостей формувальної суміші для нижньої шийки валка в межах використання відомих на сьогодні вогнетривких неметалевих матеріалів не дозволить досягти виконання умови (1), що виходить з аналізу ходу залежності, приведеної на рис. 6. Тому для вирішення даної задачі потрібне інше технічне рішення, наприклад, - екранування вал-

кової комбінованої форми в певний момент часу затвердіння розплаву в бочці, про що свідчать дані роботи [11].

Висновки:

1. Збільшення внутрішнього діаметра кокілю бочки валка сприяє зменшенню усадочної раковини в нижній шийці валка. У той же час зміна товщини кокілю бочки валка в досліджених межах не робить істотного впливу на зміну розмірів усадкової раковини в нижній шийці валка.

2. Встановлено закономірності комплексного впливу діаметрів бочки і нижніх шийок валків, розмірів і теплофізичних параметрів матеріалів комбінованої форми на послідовність затвердіння даних елементів виливка.

3. Підвищення рівня теплофізичних властивостей формувальної суміші для нижньої шийки валка в межах використання відомих на сьогодні вогнетривких неметалевих матеріалів не дозволить попередити виникнення усадкової раковини в нижній шийці валків виконання СПХН-60.

4. Підвищення рівня теплоакумуючої здатності формувальної суміші для нижньої шийки валка до $10000 \text{ Вт}\cdot\text{с}^{0.5}/(\text{м}^2\cdot\text{град})$ дозволить попередити виникнення усадкової раковини в нижній шийці валків виконання СПХН-60, але не є доцільним у зв'язку з появою шару вибіленого чавуну в нижній шийці, що неприпустимо для будь-якого прокатного валку.

Бібліографічний опис

1. Нехендзи Ю.А. Стальноелитье. Москва: Металлургиздат, 1948. 766 с.
2. Справочник по чугунолитоу : Справочник / под ред. Н.Г. Гиршовича. -3-е изд., перераб. и доп. Ленинград : Машиностроение, 1978. 758 с.
3. Богуслаев В.О. Ливарні властивості металів і сплавів для прецизійного лиття: підручник для вищих навчальних закладів; під ред. С.І. Реп'яха та В.Г. Могилатенка; 2-е вид., доп. та доопр. Запоріжжя : АТ "МОТОР СІЧ", 2016. 474 с.
4. Стальнойслиток : пат. 2368454 РФ : В 22 D 7/00, В 21 В 1/02. № 2007109914 ; заявл. 19.03.07 ; опубл. 27.09.09, Бюл. 27.
5. Теплоизоляционный вкладыш для футеровки прибыльной надставки изложницы : пат. 2240204 РФ : В 22 D 7/10. № 2003106900 ; заявл. 12.03.03 ; опубл. 20.11.04.
6. Обработка расплавленных металлов движущейся электрической дугой : пат. 2296034 РФ : В 22 D 27/02. № 2003120795 ; заявл. 12.12.01 ; опубл. 27.03.07, Бюл. 9.
7. А.с. 1015509 СССР, МКИ H05B3/60. Погружной электронагреватель агрессивной токопроводящей среды / Л.П. Головский, В.Е. Хрычиков, В.Д. Олейник, В.П. Камкин, С.Г. Подрез. № 3376470 ; заявл. 05.01.82 ; опубл. 30.04.83, Бюл. № 16.
8. А.с. 985124 СССР, МКИ С 22 С 37/10. Чугун / О.В. Пузырьков-Уваров, Е.В. Колотило, И.Г. Ермолин, В.А. Рямов, Н.А. Будагянц, Э.С. Церковский, И.В. Адамов, А.К. Кутафин, Н.А. Николаев, А.А. Филипенков, В.С. Губерт. № 3283175 ; заявл. 29.04.81 ; опубл. 30.12.82, Бюл. № 48.
9. А.с. 1419796 СССР, МКИ В 22 D 13/00. Способ центробежного литья биметаллических валков / А.И. Шевченко, В.Н. Кутозов, В.Г. Урчукин, Н.А. Будагянц, В.К. Диденко, Б.М. Климовский. № 4151970 ; заявл. 27.10.86 ; опубл. 30.08.88, Бюл. № 32.
10. А.с. 740402 СССР, МКИ В 22 D 27/00, В 22 D 25/00. Устройство для отливки валков / Н.П. Котешов, В.Е. Хрычиков, А.Н. Слюсарь, Н.С. Козаченко, Ю.Е. Плющ. № 2612876 ; заявл. 13.02.78 ; опубл. 15.06.80, Бюл. № 22.
11. Кащенко Ф.Д., Фетняева Л.А. Прокатные валки с литыми ручьями. Москва : Металлургия, 1987. 80 с.
12. Лейбензон В.О. Твердження металів і металевих композицій : підручник для ВУЗів. Київ: Наукова думка, 2009. 447 с.
13. Кутафин А.К. Исследование процесса затвердевания чугуновых отливок. *Теория и практика металлургии*. 2000. № 6 (20). С. 56-58.
14. Вейник А.И. Теория затвердевания отливок. Москва: Машгиз, 1960. 435 с.
15. Гуляев Б.Б. Литейные процессы. Москва-Ленинград : Машгиз, 1960. 416 с.
16. Рыжиков А.А., Тимофеев Г.И. Исследование свойств твердо-жидких сплавов методом моделирования. В кн. «Литейные свойства сплавов». Киев : ИПЛ АН УССР, 1973. С. 5-6.
17. Рыжиков А.А., Тимофеев Г.И. Механика кристаллизующейся отливки. В кн. «Литейные свойства сплавов». Киев : ИПЛ АН УССР, 1972. С. 6-8.
18. Наривский А.В., Моисеев Ю.В., Борисов Г.П. Эффективная вязкость алюминиевых сплавов АЛ2 и АЛ9 в интервале кристаллизации. *Литейное производство*. 1976. № 6. С. 15-16.

Reference

1. Nekhendzy Yu.A. Cast steel. Moscow: Metallurgizdat, 1948. 766 p.
2. Handbook of iron casting: Handbook / Ed. N.G. Hirshovich. - 3rd ed., revised. and additional Leningrad: Mashinostroyeniye, 1978. 758 p.
3. Boguslaev V.O. Foundry properties of metals and alloys for precision casting: textbook for higher educational institutions; under the editorship S.I. Repyakha and V.G. Graveyard; 2nd ed., add. and add. Zaporizhzhia: JSC "MOTOR SICH", 2016. 474 p.
4. Steelingot: Pat. 2368454 Russian Federation: B 22 D 7/00, B 21 B 1/02. No. 2007109914; statement 19.03.07; published 27.09.09, Bul. № 27.
5. Heat-insulating insert for lining of the profitable extension of the izlozhnitsy: pat. 2240204 Russian Federation: B 22 D 7/10. № 2003106900; statement 12.03.03; published 20.11.04.
6. Treatment of molten metals with a moving electric arc: pat. 2296034 Russian Federation: B 22 D 27/02. No. 2003120795; statement 12.12.01; published 27.03.07, Bul. № 9.
7. A.s. 1015509 USSR, MKY H05V3/60. Submersible electric heater of aggressive conductive medium / L.P. Golovsky, V.E. Khrychikov, V.D. Oleynyk, V.P. Kamkin, S.G. Undercut № 3376470; statement 05.01.82; published 04/30/83, Bull. № 16.
8. A.s. 985124 USSR, MKY C22 C37/10. Cast iron / O.V. Puzyrkov-Uvarov, E.V. Kolotylo, I.H. Ermolyn, V.A. Ryamov, N.A. Budaghyants, E.S. Tserkovsky, I.V. Adamov, A.K. Kutafin, N.A. Nikolaev, A.A. Filipenkov, V.S. Hubert. № 3283175; statement 29.04.81; published 30.12.82, Bull. № 48.

9. A.s. 1419796 of the USSR, MKY V22 D13/00. The method of centrifugal casting of bimetallic rolls / A.I. Shevchenko, V.N. Kutuzov, V.G. Urchukin, N.A. Budaghyants, V.K. Didenko, B.M. Klimkovsky. No. 4151970; statement 27.10.86; published 30.08.88, Bull. № 32.
10. A.s. 740402 USSR, Moscow State University B22 D27/00, B22 D25/00. Device for casting rolls / N.P. Koteshev, V.E. Khrychikov, A.N. Slyusar, N.S. Kozachenko, Yu.E. Ivy. № 2612876; statement 13.02.78; published 15.06.80, Bul. № 22.
11. Kashchenko F.D., Fetnyaeva L.A. Rolled rolls with cast streams. Moscow: Metallurgy, 1987. 80 p.
12. Leibenzon V.O. Solidification of metals and metal compositions: a textbook for universities. Kyiv: Naukovadumka, 2009. 447 p.
13. Kutafin A.K. Investigation of the solidification process of cast iron castings. *Theory and practice of metallurgy*. 2000. № 6 (20). Pp. 56-58.
14. Veynyk A.I. Theory of solidification of castings. Moscow: Mashgiz, 1960. 435 p.
15. Gulyaev B.B. Foundry processes. Moscow-Leningrad: Mashgiz, 1960. 416 p.
16. Ryzhikov A.A., Timofeev G.I. Investigation of the properties of solid-liquid alloys by the method of modeling. In the book "Casting properties of alloys." Kyiv: IPL Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, 1973. Pp. 5-6.
17. Ryzhikov A.A., Timofeev G.I. Mechanics of crystallized casting. In the book "Casting properties of alloys." Kyiv: IPL Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, 1972. Pp. 6-8.
18. Naryvskiy A.V., Moiseev Yu.V., Borisov G.P. Effective viscosity of aluminum alloys Al2 and Al9 in the crystallization interval. *Foundry production*. 1976. № 6. Pp. 15-16.