

УДК 621.74.04:621.746.62

Семенов О.Д., Іванова Л.Х.

Розрахунок процесу модифікування осьової зони прокатних валків із заевтектоїдної сталі з вмістом вуглецю 1,80%

Semenov A. D., Ivanova L. Kh.

Calculation of the process of modification of the axial zone of rolled rolls made of 1.80% carbon content

Мета. Встановити тривалість твердіння робочого шару прокатних валків в кокілі, розміри осьової зони з рідким та рідко-твердим металом і масу хімічних елементів-графітизаторів для введення їх в осьову зону, що зменшить вплив карбідоутворювальних хімічних елементів на структуру заевтектоїдної сталі.

Методика. Кінетику кристалізації фронтів ліквідус, виливання і солідус встановлювали за дев'ятьма експериментальними вимірами твердіння циліндричних виливків зі сплавів Fe-C, що були отримані Б. Б. Гуляєвим. Оцифрування кривих виконували в програмі AutoCAD 2010 в координатах відносного розміру виливка x/R і параметричного критерію Б. Б. Гуляєва τ/R^2 .

Результати. За результатами оцифрування та інтерполяції експериментальних даних побудовані криві кінетики твердіння фронтів ліквідус, виливання і солідус у виливках із заевтектоїдної сталі з вмістом вуглецю 1,80%. Підвищити якість прокатних валків із заевтектоїдної сталі можливо при зменшенні негативного впливу цементиту, карбідів хрому і молібдену на масу графітизатору по отриманим кривим кінетики твердіння фронтів виливання для бочки прокатного валку масою 2080 кг. Виконати технологію введення графітизатора по осі виливка доцільно згідно наведеного способу луття і схеми ливарної форми.

Наукова новизна. Вперше отримали криві кінетики твердіння фронтів виливання, солідус та ліквідус з кроком за відносним розміром виливка $0,05 x/R$ для заевтектоїдної сталі з вмістом 1,80% вуглецю. Вперше запропоновано методику розрахунку маси і часу введення графітизувального модифікатора в осьову зону валків різних розмірів відповідно до кількості рідкої та рідко-твердої фаз, які залишаються після твердіння робочого шару у бочці.

Практична значущість. Запропоновано технологію графітизувального модифікування осьової зони прокатних валків із заевтектоїдної сталі з вмістом вуглецю 1,80% для зменшення негативного впливу цементиту на фізико-механічні властивості осьової зони.

Ключові слова: твердіння, виливок, Fe-C, модифікування, розрахунок

Purpose. Determine the duration of hardening of the working layer of rolling rolls in the mold, the dimensions of the axial zone with liquid and liquid-solid metal and the mass of chemical graphitizing elements for their introduction into the axial zone, which will reduce the influence of carbide-forming chemical elements on the structure of the eutectoid steel.

Methodology. The crystallization kinetics of the liquidus, pouring, and solidus fronts were determined based on nine experimental measurements of the hardening of cylindrical castings from Fe-C alloys obtained by B. B. Gulyaev. Curves were digitized in the AutoCAD 2010 program in the coordinates of the relative size of the casting x/R and the parametric criterion of B. B. Gulyaev τ/R^2 .

Results. According to the results of digitization and interpolation of experimental data, the curves of the hardening kinetics of the liquidus, pouring and solidus fronts in castings made of post-eutectoid steel with a carbon content of 1.80% were constructed. It is possible to improve the quality of rolling rolls made of post-eutectoid steel by reducing the negative impact of cementite, chromium and molybdenum carbides on the structure of the axial zone due to the introduction of graphitizing elements, which must be implemented only after hardening in the mold of the working layer of post-eutectoid steel. Therefore, the duration of hardening of the working layer in the barrel of the roll, the dimensions of the axial zone with liquid and liquid-solid metal were consistently calculated, and the mass of chemical graphitizing elements was set for this mass of liquid. An example of calculating the mass of the graphitizer based on the obtained curves of the hardening kinetics of the pouring front for a barrel of a rolled roll with a mass of 2080 kg is given. It is advisable to implement the technology of introducing the graphitizer along the axis of the casting according to the given method of casting and the scheme of the foundry mold.

Scientific novelty. For the first time, the curves of the hardening kinetics of the casting fronts, solidus and liquidus with a step of the relative size of the casting of $0.05 x/R$ for a pre-eutectoid steel with a carbon content of 1.80% were obtained. For the first time, a method of calculating the mass and time of introducing a graphitizing modifier into the axial zone of rolls of different sizes according to the amount of liquid and liquid-solid phases that remain after the hardening of the working layer in the barrel is proposed.

Practical significance. The technology of graphitizing modification of the axial zone of rolling rolls made of post-eutectoid steel with a carbon content of 1.80% is proposed to reduce the negative impact of cementite on the physical and mechanical properties of the axial zone.

Key words: hardening, casting, Fe-C, modification, calculation

Вступ.

А. Є. Кривошеєв ще середині ХХ століття сформулював основні вимоги до валків для прокатних

станів: вони повинні мати зносостійкий і термостійкий (для валків гарячого плющення) робочий шар, міцне і в'язке осердя бочки і шийок. Відомо, що пі-

движення якості та експлуатаційних властивостей валків дозволить збільшити тривалість безперервної роботи прокатного стану, скоротити кількість валків, які необхідно замовляти у вальцеливарників, підвищити техніко-економічні показники виробництва, а також освоїти нові ринки збуту прокату.

Прокатні валки виготовляють литтям із чавуну, заевтектної сталі і куванням зі злитків. Для різних прокатних станів і клітей обирають валки, які за твердістю, мікро- і макроструктурою забезпечують максимальну експлуатаційну стійкість в умовах ударних та згинальних навантажень, що циклічно змінюються, і сил тертя за високотемпературної дії прокату.

Розрізняють наступні основні типи валків: листопрокатні, сортопрокатні і трубопрокатні, папіро- і картоноробні, гумотехнічні, мукомольні, маслобойні і фарботерні. Вальцеливарні підприємства відливають валки в стаціонарні форми або відцентровим способом лиття, з гладкою бочкою або з литими калібрами. Застосування відцентрового способу лиття дозволяє зменшити витрати легированого металу, підвищити твердість і глибину ро-

бочого шару, але вимагає значних капітальних витрат на виготовлення спеціального устаткування, точного дотримання технологічного процесу лиття і виконання великих вимог до техніки безпеки. При високій швидкості обертання виливниці і рідкого металу навіть незначне порушення центру мас обертання призводить до тяжких наслідків. Тому, більшу частину прокатних валків виготовляють в стаціонарних ливарних формах, але такі валки не завжди забезпечують високі вимоги виробників прокату. Дана стаття присвячена рішення проблемі підвищення якості прокатних валків, які виготовляють литтям у стаціонарні ливарні форми.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми.

Ливарна форма для лиття валків складається з таких елементів (рис. 1): піщано-глинистої форми нижньої шийки (2, 3), кокільної частини (5), що формує бочку валка (6), піщано-глинистих форм верхніх шийок (7, 8), надливу (9 - 11) і елементів литникової системи (12, 13, 17). Чистові розміри валка (після механічного оброблення) наведені тонкими лініями (див. рис. 1).

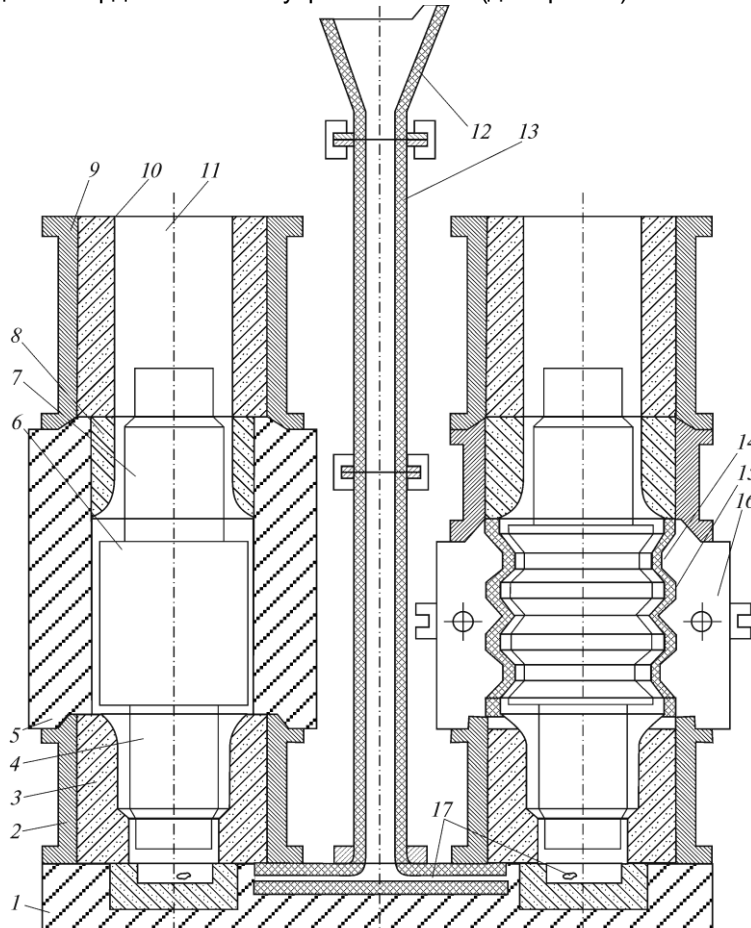


Рис. 1. Схема форми для лиття валків із гладкою бочкою і з литими калібрами (тонкими лініями позначені чистові розміри валків) [1]:

1 - двомісний піддон; 2 - форма нижньої шийки; 3 - формувальна суміш; 4 - нижня шийка прокатного валка; 5 - кокіль; 6 - бочка прокатного валка; 7 - верхня шийка прокатного валка; 8 - «закладення» – формувальна суміш в кокілі; 9 - форма надливу; 10 - формувальна суміш надливу; 11 - надлив; 12 - лійка; 13 - стояк; 14 - виступ калібру кокілю; 15 - западина калібру кокілю; 16 - кокіль з литими калібрами і вертикальним роз'ємом; 17-тангенціальний живильник

Заливання форм через сифонну литникову систему з тангенціальним підведенням живильника 17 у нижню шийку валка забезпечує інтенсивне обертання розплаву у формі і, за рахунок цього, відтиснення шлакових включень з робочого шару бочки в осьову зону. Твердіння шийок і надливу в піщано-глинистих елементах форми сприяє зменшенню відведення тепла від рідкого металу і, внаслідок цього, в структурі утворюється незначна кількість крихкої цементної складової. Згідно діючим технічним умовам у шийках і трехах допускається наявність окремих фосфідокарбідних включень, але карбідна сітка є ознакою бракування виливків.

Важливим показником зносостійкості валків є твердість робочого шару бочки та його глибина. Бочка охолоджується в чавунному кокілі (див. рис. 1), який забезпечує інтенсивне відведення тепла від рідкого металу в початковий період твердіння робочого шару бочки і формування зносостійких, але крихких цементитних структурних складників. Подальше нагрівання кокілю, усадка металу робо-

чого шару, що затвердів, сприяє утворенню усадкового зазору між бочкою валка і кокілем, зменшенню швидкості охолодження і відведенню тепла кристалізації від рідкого металу. Тому, в перехідному шарі і осьовій зоні бочки підвищується кількість і площа графітних включень. Але часто хімічні елементи IV – VII груп періодичної системи утворюють з вуглецем цементит Fe_3C , карбіди TiC , Mo_2C та інші, що зменшує міцність осьової зони валка. На рис. 2 наведено стовпчасту макроструктуру не тільки в робочому шарі, а і в осьовій зоні, що зменшує міцність валка при його експлуатації [1].

Крім того, кількісний аналіз структурних складників по глибині бочки валка показав збільшення площі цементиту з 18% на глибині 130 мм до 22% в центрі виливка, незважаючи на нагрівання ливарної форми у процесі твердіння виливка і зменшення швидкості охолодження сплаву в інтервалі температур ліквідус-солідус [1].

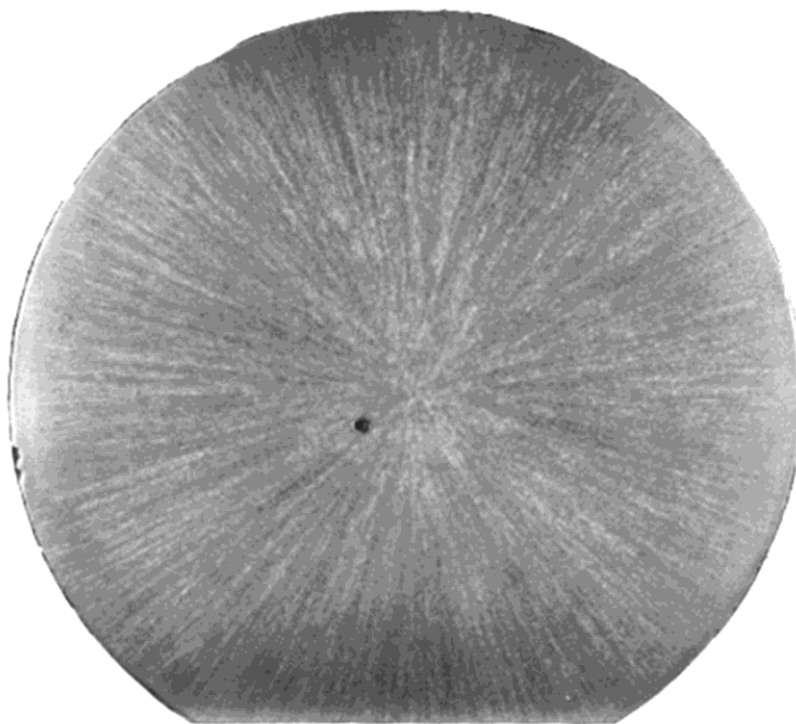


Рис. 2. Стовпчаста макроструктура бочки прокатного валка з високоміцного чавуну, що охолоджувався в кокілі $\varnothing 450$ мм [1]

Литі прокатні валки із заєвтектоїдних сталей поступово заміщують валки ковані, в яких вміст вуглецю не перевищує 0,85-0,95%. Найбільш відома сталь для лиття валків марки 150ХНМ (ГОСТ 9487-80) містить 1,4-1,6 %С; 0,25-0,50 %Si; 0,50-0,80 %Mn; 0,8-1,25 %Cr; 0,8-1,25 %Ni; 0,1-0,3 %Mo. Завдяки більшій кількості вуглецю ці валки мають високу зносостійкість і дешевше кованих. Але за даними Е.Н. Шестакова та інших дослідників, недоліком литих валків із заєвтектоїдної сталі є зменшення тимчасового опору, відносного подовження та ударної в'язкості центральних зон. Частково не-

обхідні властивості валкам надають спеціальним термічним обробленням. Автори відзначають, що підвищення вуглецю збільшує крихкість сталей, ліквідація вуглецю і домішок посилюється від поверхні литого валка до його осі. У структурі валка спостерігається майже безперервна карбідна сітка за межами аустенітних зерен.

АТ «Дніпропетровський завод прокатних валків» (ДЗПВ) виготовляє валки із заєвтектоїдної сталі марок 150ХНМ і 170ХНМ. Так, сталь марки 170ХНМ має такий хімічний склад: 1,4-2,2 %С; 0,20-1,2 %Si; 0,50-1,3 %Mn; 0,5-2,5 %Cr; 0,5-2,0 %Ni;

0,2-1,0 %Mo; $P \leq 0,03\%$; $S \leq 0,03\%$. Середнє значення вмісту вуглецю в цій сталі дорівнює 1,8%. З підвищенням вмісту вуглецю в структурі осьової зони валка також встановлено утворення безперервної карбідної сітки за межами аустенітних зернин. Якість прокатних валків із заєвтектної сталі можливо покращити при зменшенні негативного впливу цементиту, карбідів хрому і молібдену на структуру осьової зони виливків за рахунок введення в осьову зону графітизувальних хімічних елементів. Але реалізувати це необхідно тільки після твердіння в кокilі робочого шару із заєвтектної сталі. Тому необхідно встановити тривалість твердіння робочого шару, розміри осьової зони з рідким та рідко-твердим металом і на цю масу металу розрахувати масу хімічних елементів-графітизаторів.

Мета роботи. Встановити тривалість твердіння робочого шару прокатних валків в кокilі, розміри осьової зони з рідким та рідко-твердим металом і масу хімічних елементів-графітизаторів для введення їх в осьову зону, що зменшить вплив карбидоутворювальних хімічних елементів на структуру заєвтектної сталі.

Методи дослідження.

Кінетику кристалізації фронтів ліквідус, виливання і солідус встановлювали за дев'ятьма експериментальними вимірами твердіння циліндричних виливків зі сплавів Fe-C, що були отримані Б. Б. Гуляєвим, О. Н. Магницьким, Л. М. Постновим (1960 р.). Оцифрування твердіння сплавів з вмістом вуглецю 0,04%, 0,1%, 0,4%, 0,93%, 1,42%; 2,44%, 3,28%, 4,45%, 4,83% виконували в програмі AutoCAD 2010 за методикою [2] в координатах x/R і t/R^2 , де x – товщина затверділого шару металу; R – радіус виливка; t – час твердіння. Параметричний критерій Б. Б. Гуляєва ($Gu = t/R^2$) заснований на використанні критерію Фур'є (at/R^2), в якому температуропровідність (a) введено у кінцеве значення чисельного результату вимірювання у зв'язку із застосуванням ливарної форми з постійним значенням коефіцієнту температуропровідності, а на осі ординат відкладений відносний розмір виливка x/R . Тому, при $a = \lambda/c\rho$ параметричний критерій дорівнює:

$$\frac{t}{R^2} = Fo \frac{c\rho}{\lambda} = Gu, \quad (1)$$

де c – питома теплоємність сплаву;

ρ – густина сплаву;

λ – теплопровідність сплаву.

Час твердіння виливків встановлювали за формулою:

$$t = Gu \cdot R^2, \quad (2)$$

де Gu – коефіцієнт, який узагальнює теплофізичні властивості сплаву, які постійно змінюються при затвердінні шару металу (x/R) від 0 до 1 і

встановлюються за експериментальною кривою кінетики фронту твердіння.

Використання критерію $Gu = t/R^2$, який змінюється при затвердінні металу у виливку, принципово відрізняється від рівняння квадратного кореня [1], у якому коефіцієнт твердіння постійний на протязі твердіння всього виливка:

$$t = R^2/k^2, \quad (3)$$

де k – коефіцієнт твердіння;

R – радіус виливка.

Причому, значення коефіцієнта твердіння (k) для виливків зі сталі у всьому діапазоні хімічних складів дорівнює $0,30 \text{ см/с}^{0,5} - 0,35 \text{ см/с}^{0,5}$, а для чавунних виливків – $0,25 \text{ см/с}^{0,5} - 0,30 \text{ см/с}^{0,5}$ [1, 2].

Оброблення експериментальних термографічних вимірів в координатах x/R і t/R^2 не універсальне, тому що їх можливо розповсюджувати тільки для ливарних форм, матеріал яких співпадає з матеріалом форми виконаних досліджень. Розроблену Б.Б. Гуляєвим методику успішно використовували чеські вчені наукової школи М.І. Хворінова ще в середині XX століття, потім застосовували В.В. Назаратін, П.Ф. Василевський, вчені кафедри ливарного виробництва Національної металургійної академії України і підтвердили доцільність використання термографічних вимірів в координатах x/R і t/R^2 для інженерних розрахунків твердіння виливків різних розмірів [2-4].

Результати дослідження.

В процесі оцифрування і інтерполяції експериментальних термографічних досліджень Б. Б. Гуляєва отримано 20 кривих твердіння фронтів солідус, виливання та ліквідус з кроком за відносним розміром виливка $0,05 \ x/R$ і з кроком за вмістом вуглецю 0,05% C в інтервалі хімічних складів $0,04\% \text{C} \dots 4,83\% \text{C}$ [2, 4, 5].

На АТ ДЗПВ валки із заєвтектної сталі марки 170ХНМ мають середнє значення вмісту вуглецю 1,8%. Тому на кривих інтерполяції хімічних складів сплавів $0,04\% \text{C} \dots 4,83\% \text{C}$ із масиву отриманих нами даних обирали по 20 точок з 1,8% вуглецю і будували криві кінетики твердіння (рис. 3) фронтів ліквідус (1), виливання (2) і солідус (3).

Розрахунок маси і часу введення графітизувального модифікатора в осьову зону валка виконували відповідно до кількості рідкої та рідко-твердої фаз, які залишаються після твердіння робочого шару у бочці валків різних розмірів, за послідовністю:

Визначити відносну товщину робочого шару бочки валка з врахуванням припусків на усадку і механічну обробку.

Розрахувати час проникнення границі виливання робочим шаром бочки до товщини, яка повинна відповідати вимогам замовника продукції.

Розрахувати об'єм і масу рідкої та рідко-твердої осьової зони в бочці валка.

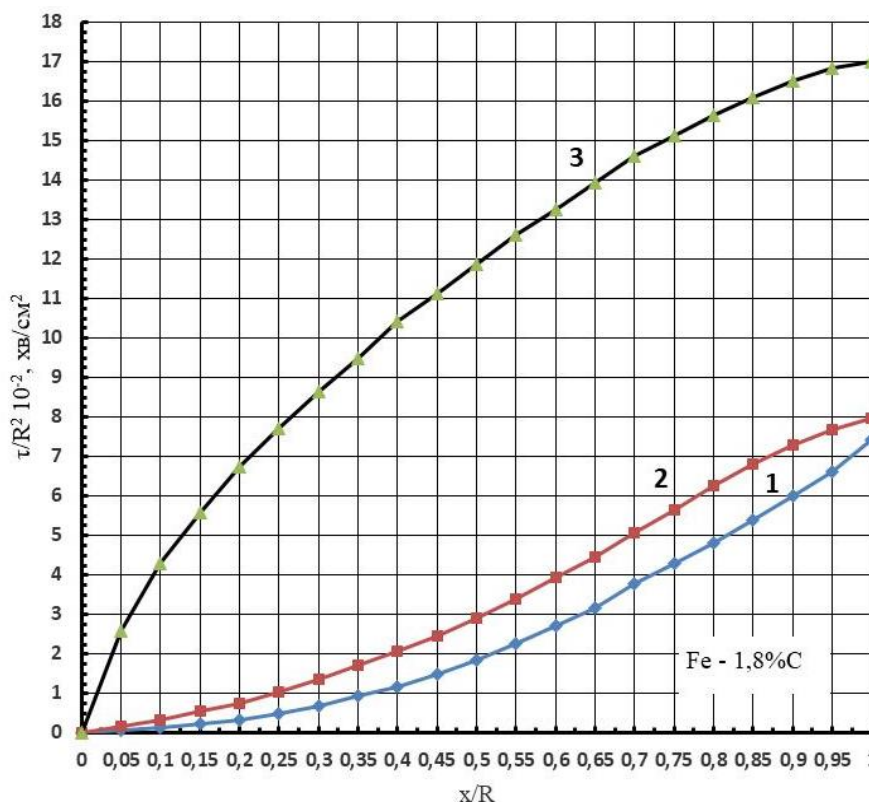


Рис. 3. Розрахункові криві кінетики твердіння фронтів ліквідус (1), виливання (2) і солідус (3) у виливці зі сплаву Fe–1,8%С, що охолоджується у циліндричній чавунній виливниці: T – час, хв; R – радіус виливка, см; x – товщина затверділого шару металу

Розрахувати товщину затверділого шару сталі в нижній і верхній шийках.

Розрахувати об'єм і масу рідкої та рідко-твердої осьової зони в нижній і верхній шийках на момент закінчення твердіння робочого шару бочки.

Розрахувати загальну масу рідкої та рідко-твердої сталі в осьовій зоні валка.

Розрахувати масу графітуючого модифікатора для введення в осьову рідку та рідко-тверду зону бочки, нижньої і верхньої шийок валка.

В роботі [3] встановлювали тривалість електрошлакового обігрівання валка чорною масою 4100 кг із сталі 150ХНМ, який відлили 15.06.2016 р. у вальцеливарному цеху АТ ДЗПВ, плавка №2-36. Розрахунок було виконано при оцінці просування фронту твердіння солідус в осьовій зоні ($x/R = 1$) [3]. Нами показано, що оцінка по солідус дає завищені результати у порівнянні з розрахунком по границі виливання. Аналогічний висновок отримано нами при литті валків із високоміцного чавуну [6]. Тому на прикладі того ж валка чорною масою 4100 кг із заевтектної сталі з 1,80% С розраховували час твердіння робочого шару, об'єм рідкої та рідко-твердої зон, в які необхідно ввести модифікатор для графітазації і зменшення кількості цементиту в осьовій зоні. Твердіння шийок, які охолоджуються у піщано-глинистих формах, в даному прикладі не розглядали.

Розміри бочки валка, яка охолоджується в кокілі, дорівнює: $\varnothing$ 520 мм, висота $h = 1400$ мм. Товщину робочого шару в бочці необхідно отримати

50 мм. Тоді відносна товщина робочого шару складає:

$$x/R = 50 : 260 = 0,1923.$$

На осі абсцис від значення $x/R = 0,1923$ (див. рис. 3) проводили перпендикуляр вгору до границі виливання 2, а від неї горизонтальну пряму до осі ординат і встановлювали значення параметричного критерію Б.Б. Гуляєва (1) і час (2) введення графітуючого хімічного елементу в осьову зону прокатного валка:

$$\tau/R^2 = 0,7352 \cdot 10^{-2} \text{ хв/см}^2, \quad (4)$$

$$\tau = 0,7352 \cdot 10^{-2} \cdot R^2 = 0,7352 \cdot 10^{-2} \cdot (26)^2 = 4,97 \text{ хв, або } 4 \text{ хв } 58 \text{ с.} \quad (5)$$

На цей час діаметр зон рідкого та рідко-твердого металу у формі дорівнює: 520 мм – (2·50 мм) = 420 мм. При висоті бочки $h = 1400$ мм об'єм цих зон становить $V_{P-T} = 193864 \text{ см}^3$. Маса сталі у цих зонах дорівнює:

$$m_{P-T} = V_{P-T} \cdot \rho_c = 193864 \text{ см}^3 \cdot 7 \text{ г/см}^3 = 1357048 \text{ г} \approx 1357 \text{ кг,}$$

де ρ_c – густина рідкого металу 7 г/см^3

Відомо, що модифікування сплавів Fe-C в литниковій системі забезпечує високі фізико-механічні властивості виливків [7-9]. Однак, запропоновані технології призначені для фасонних дрібних вили-

вків і їх неможливо використати для масивних виливків, якими є прокатні валки, тому що тривалість твердіння робочого шару в ливарній формі є на порядок більшою [6]. Процес графітизувального модифікування прокатних валків в ливарній формі після кристалізації робочого шару в бочці валка

розроблено в роботі [10]. Показано, що алюміній та лігатури на його основі дозволяють зменшити в осьовій зоні кількість цементиту. Тому, для реалізації цієї технології на рис. 5 наведено схему ливарної форми для введення алюмінію по осі виливка [11].

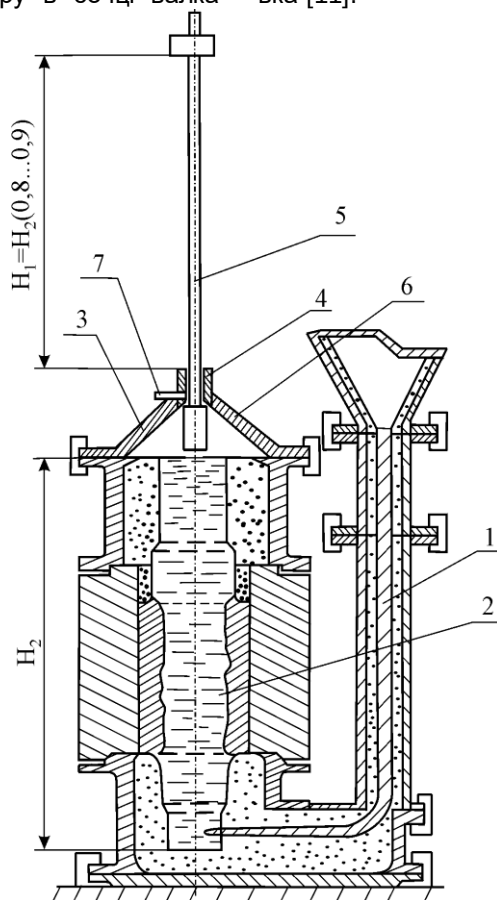


Рис. 5. Ливарна форма для одержання двошарових листопрокатних валків з пристроєм для модифікування, який занурюють в нижню шийку [11]:

1 – литникова система; 2 – рідкий метал, що залишився після твердіння робочого шару; 3 – пристрій для введення модифікатора; 4 – пряма труба; 5 – штанга з модифікатором на нижній частині; 6 – опора; 7 – фіксатор переміщення штанги

Наприклад, для бочки прокатного валка $\varnothing 520$ мм, висотою $h = 1400$ мм і масою 2080 кг, кількість алюмінію приймали 0,1% від маси рідкого та рідко-твердого сплаву ($m_{p-r} \approx 1357$ кг). Отже, маса алюмінію для графітизувального модифікування бочки валка із заевтектоїдної сталі з 1,80% С дорівнює $m_{Al} \approx 1,357$ кг.

Таким чином, використання кривих кінетики твердіння фронтів ліквідус, виливання і солідус дозволяє розраховувати в першому наближенні технологічні процеси модифікування і розкислення осьової зони прокатних валків із заевтектоїдної сталі після твердіння робочого шару у кокilі.

Висновки

Литі прокатні валки із заевтектоїдних сталей поступово замінюють валки ковани, в яких вміст вуглецю не перевищує 0,85-0,95%. Завдяки більшій кількості вуглецю литі валки мають високу зносо-

стійкість і дешевше кованих. Але недоліком литих валків є зменшення тимчасового опору, відносного подовження та ударної в'язкості центральних зон. У структурі валків спостерігається майже безперервна карбідна сітка за межами аустенітних зернин.

Підвищити якість прокатних валків із заевтектоїдної сталі можливо при зменшенні негативного впливу цементиту, карбідів хрому і молібдену на структуру осьової зони виливків за рахунок введення в неї графітизувальних хімічних елементів. Але реалізувати це необхідно тільки після твердіння в кокilі робочого шару із заевтектоїдної сталі. Тому, необхідно спочатку встановити тривалість твердіння робочого шару, а потім розміри осьової зони з рідким та рідко-твердим металом і на цю масу металу розрахувати масу хімічних елементів-графітизаторів.

Для реалізації поставленої задачі використовували результати дев'яти експериментальних тер-

мографічних досліджень твердіння в кокілі циліндричних виливків із залізвуглецевих сплавів з 0,04% С; 0,1% С; 0,4% С; 0,93% С; 1,42% С; 2,44% С; 3,28% С; 4,45% С; 4,83% С, які наведені в роботах Б.Б. Гуляєва, оцифрували їх і отримали криві кінетики твердіння фронтів солідус, виливання та ліквідус з кроком по відносному розміру виливка 0,05 x/R для заевтектоїдної сталі з 1,80% С.

Наведено послідовність виконання розрахунків маси і часу введення графітизувального модифікатора в осьову зону валків різних розмірів відповідно до кількості рідкої та рідко-твердої фаз, які залишаються після твердіння робочого шару у бо-

чці. З використанням кривих кінетики твердіння фронтів ліквідус, виливання і солідус сплаву Fe–1,8%С виконано розрахунок для бочки прокатного валка Ø520 мм, $h = 1400$ мм і масою 2080 кг. Після твердіння через 4 хв 58 с робочого шару, в кокілі залишається в осьовій зоні 1357 кг рідкого та рідко-твердого сплаву. Для графітизувального модифікування осьової зони бочки валка із заевтектоїдної сталі з 1,80% С доцільно ввести 0,1% алюмінію масою 1,357 кг. Реалізувати таку технологію введення модифікатора по центру виливка пропонуємо відомим способом лиття і схемою ливарної форми.

Список літератури

1. Лейбензон В.О., Пілюшенко В.Л., Кондратенко В.М., Хричиков В.Є., Недопьокін Ф.В., Білоусов В.В., Дмитрієв Ю.В. Тверднення металів і металевих композицій / Підручник для ВУЗів. Видання друге, доопрацьоване. Київ: Наукова думка. – 2009.- 447 с. (in Ukrainian). https://nmetau.edu.ua/file/tverdinnya_metaliv_i_metalevih_kompozitsiy_pidruchnik..pdf
2. Семенов О.Д., Хричиков В.Є., Куцова В.З., Меньяйло О.В. Розрахунок кінетики просування фронту кристалізації ізосолідус залізвуглецевих сплавів у циліндричних формах. ISSN 0235-5884. *Процеси лиття*. 2021, № 2 (144). 31-38 с. <https://doi.org/10.15407/plit2021.02.023>
3. Меньяйло О.В. Наукові і технологічні основи процесів спрямованого твердіння масивних виливків із залізвуглецевих сплавів у комбінованих циліндричних формах. Дис. д. т. н. за спеціальністю 05.16.04 Ливарне виробництво. НМєАУ. Захищено у спец. раді Д 26.232.01 ФТМС НАН України, Київ, 2020. – 289 с.
4. Семенов О.Д., Хричиков В.Є., Меньяйло О.В., Афандиліанц Є.Г., Гнилокурєнко С.В. Вплив вмісту вуглецю на тривалість кристалізації фронту ізоліквідус сплавів Fe-C у циліндричних формах. *Теорія і практика металургії*. 2022. №3. с. 57-62.
5. Семенов О.Д., Хричиков В.Є. Аналіз кінетических кривих затвердевания с целью определения продолжительности затвердевания оливок из Fe-C сплавов. *Перспективні технології, матеріали та обладнання у ливарному виробництві: матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції, 25–28 вересня 2017 р.* / ред. А. М. Фесенка, М. А. Турчаніна. Краматорськ: ДДМА, 2017. С. 112-114. <http://www.dgma.donetsk.ua/docs/kafedry/tolp/publication/tolpkonf/%D0%A2%D0%B5%D0%B7%D0%B8%D1%81%D1%8B2017.pdf>
6. V.E. Khrychikov, H.V. Meniailo, O.D. Semenov, Y.G. Aftandiliants, S.V. Gnyloskurenko. Graphitizing modification of the axial zone of cast iron rolling rolls in the liquidus-solidus temperature range. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. Dnipro, Ukraine. 2023, № 1. P. 67-73. **Scopus**. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-1/067>.
7. Fesenko, E.V., Mogylatenko, V.G., Fesenko, A.N., Kosyachkov, V.A., Fesenko, M.A. Manufacture of two-layers and double-sided iron castings with differential structure and properties. «EUREKA: Physical Sciences and Engineering», 2015, №1, 55-59 с. **Scopus**. https://foundry.kpi.ua/wp-content/uploads/2020/03/maksym_fesenko.pdf.
8. Kalinin, V.T., Khrychikov, V.E., Krivosheev, V.A., Menyailo, E.V. Theory and practice of cast-iron inoculation by ultra - and nanodispersed materials. *Metallurgical and Mining Industry*. 2(5), 2010.- с. 341-347. **Scopus**. <https://www.scopus.com/sourceid/21100197765?origin=resultslist>
9. Fesenko M.A., Fesenko A.M.. In-mould graphitizing, spheroidizing, and carbide stabilizing inoculation of cast iron melt. *Progress in Physics of Metals*. 2020. 21(1), с. 83-101. **Scopus**. <https://doi.org/10.15407/ufm.21.01.083>.
10. Хитько О.Ю., Іванова Л.Х., Хричиков В.Є. Модифікатор для внутрішньо форменного модифікування осьової зони прокатних валків // *Теорія і практика металургії*. –2021. –№ 3. –С. 26–30. <https://doi.org/1034185/tpm.3.2021.04>
11. Пат. 80101 Україна, МПК (2006) В 22 D 7/06 (2007.01); В 22 D 15/00; В 22 D 27/20 (2007.01); С 21 С7/04; С 21 С 7/076 (2007.01); С 22 С 35/00. Спосіб виготовлення виливків для одержання двохшарових листопрокатних валків, ливарна форма і модифікатор для здійснення способу / Хричиков В.Є., Хитько О.Ю., Кліменко Ф.К., Бойко Л.Г.; заявник та патентотримувач Національна металургійна академія України. - № 20040604860; заявл. 21.06.04; опубл. 27.08.07, Бюл. № 13. <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=23788>
- 12.

13. Відповідальний автор: Іванова Л.Х., доктор технічних наук, професор, Український державний університет науки і технологій, професор кафедри ливарного виробництва (м. Дніпро, Україна), тел. +380661167100; +380678672247; e-mail: ivanovalitvo@gmail.com