

УДК 621.746.62

Семенов О.Д., Хричиков В.Є., Меняйло О.В., Афтанділянц Є.Г., Гнилокурченко С.В.

Вплив вмісту вуглецю на тривалість кристалізації фронту ізоликвідус сплавів Fe-C у кокільних циліндричних формах Semenov A. D., Khrychikov V. E., Menailo H. V., Aftandiliants Y. G., Gnyloskurenko S. V. INFLUENCE OF CARBON PERCENTAGE ON THE DURATION OF THE CRYSTALLIZATION FRONT OF ISOLIQUIDUS Fe-C ALLOYS IN CHILL MOLD CYLINDRICAL FORMS

Мета. Встановити тривалість кристалізації фронту ізоликвідус сплавів Fe-C в діапазоні 0,04 ... 4,83 %C, що охолоджуються у кокільних циліндричних формах. **Методика.** Тривалість кристалізації фронту ізоликвідус встановлювали по дев'яти експериментальним вимірам твердіння циліндричних виливків зі сплавів Fe-C, що отримані Б.Б. Гуляєвим, О.Н. Магницьким, Л.М. Постновим. Оцифровку 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 в координатах x/R і t/R^2 , де x – товщина шару металу, що затвердіє; R – радіус виливка; t – час твердіння. **Результати.** В процесі оцифровки і інтерполяції експериментальних термографічних досліджень отримано 20 кривих твердіння фронту ізоликвідус з кроком по відносному розміру виливку 0,05 x/R і по вмісту вуглецю 0,05% в інтервалі хімічних складів 0,04 ... 4,83%С. Наведено приклади розрахунку тривалості твердіння виливків різних хімічних складів в сплавах Fe-C при охолодженні у кокільних циліндричних формах. Максимальна тривалість твердіння при 0,1%С обумовлено виділенням високою кількістю твердої фази ≈ 60 % поблизу температури ліквідус, а при 0,30 - 0,45%С зменшення тривалості твердіння обумовлено зменшенням кількості твердої фази до ≈ 7 %. Ще менша тривалість твердіння при температурі ліквідус у чавуні: при 3,5%С виділяється лише 2 - 3% твердої фази. Експериментальні криві охолодження також фіксують у чавуні незначну температурну зупинку на кривій охолодження при температурі ліквідус і велику – при солідус. Тому виділення більшої частини прихованої теплоти кристалізації відбувається при температурі солідус і загальна тривалість твердіння 100% твердої фази у чавуні більша, а ливарні властивості доевтектичних і евтектичних чавунів значно вищі, ніж у сталі. **Наукова новизна.** Вперше теоретично визначено вплив хімічного складу сплавів Fe-C у діапазоні 0,04...4,83%С на кінетику просування фронту твердіння ліквідус за параметричним критерієм t/R^2 і відносним розміром x/R від поверхні до центру циліндричних виливків, що охолоджуються у кокіль. Вперше встановлено вплив на тривалість твердіння кількості твердої фази при температурі ізоликвідус і нерівномірності розподілу частки прихованої теплоти кристалізації при температурах ліквідус і солідус. **Практична значущість.** За наведеними прикладами розрахунку тривалості твердіння фронту ізоликвідус обґрунтовано кращі ливарні властивості сплавів, в яких при температурі ліквідус кількість виділення твердої фази мінімальна. За отриманим масивом даних можливо побудувати кінетику просування фронту ліквідус по товщині циліндричного виливку, а за гіпотезою приведеної товщини М.І. Хворінова встановити тривалість твердіння виливків у формі куля і плита.

Ключові слова: твердіння, ліквідус, виливки, Fe-C, тверда фаза

Purpose is to set the crystallization rate to the front of the isoquidus Fe-C alloys in the range of 0.04...4.83%C, which cools down in cylindrical molds. **Methodology.** The duration of crystallization of the isoquidus front was established according to nine experimental measurements of the solidification of cylindrical castings in Fe-C alloys, which were taken by B.B. Gulyaev, O.N. Magnitsky, L.M. Postnov. Digitization of solidification of alloys with composes of carbon 0.04%, 0.1%, 0.4%, 0.93%, 1.42%; 2.44%; 3.28%; 4.45%, 4.83% was made in AutoCAD 2010 in coordinates of x/R and t/R^2 , where x – thickness of solidified layer of metal; R – is the radius of the casting; t – is time. **Results.** In the process of digitization and interpolation of experimental thermographic data, 20 solidification curves were gotten for the front of insulation with a step according to the thickness of the casting 0.05 x/R and according to the amount of carbon 0.05% in the interval of chemical composes 0.04...4.83%C. Introduced calculation of duration of solidification of casting various chemical compounds in Fe-C alloys when cooled in chill-molds of cylindrical shape. The maximum solidification duration at 0.1%C is associated with a high solid phase density of $\approx 60\%$ near the liquidus temperature, and at 0.30 - 0.45%C, a change in solidification duration is associated with a change in solid phase density up to $\approx 7\%$. There is even less solidification at liquidus temperature in iron: only 2 - 3% of the solid phase at 3.5%C. Experimental cooling curves also fix in iron an insignificant temperature stop on the cooling curve at liquidus temperature and large - at solidus. Therefore, a greater part of the latent heat of crystallization shows up at temperatures of solidus. This leads to longer duration of 100% solid phase in iron more, and the casting properties of near eutectic and eutectic irons is significantly higher, rather than in steel. **Originality.** The input of the chemical composes of Fe-C alloys in the range of 0.04...4.83%C was theoretically assigned to the kinetics of pushing the front of the solidification near liquidus with the parametric criterion t/R^2 and the relative value x/R from the surface to the center of the cylindrical castings, cooling at the chill-mold, for the first time. Influence of the amount of solid phase at the temperature of isoquidus and uneven distribution of the latent heat of crystallization at liquidus and solidus temperatures was established. **Practical value.** Based on the given examples of calculation of the duration of the solidification of the isoquidus front, the best casting properties have alloys in which the amount of solid phase separation is minimal at the liquidus temperature. Based on the obtained array of data, it is possible to construct the kinetics of the advancement of the liquidus front along the thickness of the cylindrical casting, and based on the reduced thickness hypothesis, M.I. Hovorinov set the duration of solidification of castings in the form of a ball and a plate.

Key words: solidification, liquidus, castings, Fe-C, solid phase

Семенов О.Д.,	
Хричиков В.Є.,	
Меняйло О.В.	
., Афтанділянц Є.Г.,	
Гнилокурченко С.В.	

Вступ.

Ливарні підприємства України забезпечують металургійні і машинобудівні заводи виливками із залізовуглецевих сплавів, у тому числі для військово-промислового комплексу, але виснаження запасів багатих руд та доступних родовищ, постійне підвищення цін на енергоресурси та металеву шихту обумовлюють скорочення обсягів виробництва. Нівелювати ці негативні наслідки доцільно підвищенням експлуатаційних властивостей виливків, що також дозволить освоїти нові ринки збуту.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми.

Кристалізація металу в інтервалі температур ліквідус-солідус часто призводить до виникнення у виливках браку: усадкових раковин та пористості, гарячих тріщин, пригару, ситоподібних раковин, ливарних напружень [1]. Попередити їх утворення та розробити рекомендації по їх зменшенню допоможе знання о кінетики твердіння сплавів Fe-C.

Результати експериментальних досліджень процесів кристалізації масивних виливків і їх аналіз дозволяють корегувати конструкцію ливарної форми за для усунення усадкових дефектів [2], регулювати структуру і властивості двошарових виливків [3], розробляти нові ливарні сплави, призначені для експлуатації в екстремальних умовах та технології виготовлення виливків з них [4].

Математичне моделювання процесу твердіння металів та сплавів з урахуванням фазового переходу дозволяє підвищити точність розрахунків і зменшити тривалість доопрацювання технологічних процесів лиття та конструкції ливарних форм [5]. Але всі математичні моделі проходять етап адаптації і корегування теплофізичних коефіцієнтів для узгодження з еталонними експериментальними дослідженнями твердіння різних видів сплавів і ливарних форм. Тому базу даних експериментальних термографічних досліджень необхідно поповнювати та оновлювати. В [6] наведено розрахунок кінетики просування фронту кристалізації ізосолідус залізовуглецевих сплавів у циліндричних формах по даним експериментальних вимірів. Однак знання о тривалості кристалізації фронту ізосолідус без визначення кінетики просування фронту ліквідус не дозволяють прогнозувати утворення ливарних дефектів в інтервалі температур кристалізації.

Мета роботи – встановити тривалість кристалізації фронту ізоліквідус залізовуглецевих сплавів в діапазоні 0,04...4,83%С, які охолоджуються у циліндричних формах.

Методи дослідження.

Тривалість кристалізації фронту ізоліквідус встановлювали по дев'яти експериментальним вимірам твердіння циліндричних виливків зі сплавів Fe-C, що отримані Б.Б. Гуляєвим, О.Н. Магницьким, Л.М. Постновим [7]. Оцифровку твердіння сплавів з вмістом вуглецю 0,1%, 0,4%, 0,93%, 1,42%, 2,44%, 3,28%, 4,45%, 4,83% (рис. 1) та 0,04% [7] виконували в програмі AutoCAD 2010 за

методикою [6] в координатах x/R і t/R^2 , де x – товщина шару металу, що затвердів; R – радіус виливка; t – час твердіння. Параметричний критерій Гуляєва Б.Б. (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 форм з постійним значенням коефіцієнту температуропровідності, а на осі ординат відкладений відносний розмір виливка x/R [7]. Тому при $a = \lambda/c\rho$ параметричний критерій дорівнює:

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

де c – питома теплоємність сплаву;

ρ – густина сплаву;

λ – теплопровідність сплаву.

Час твердіння виливків встановлювали по формулі:

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

де Gu – коефіцієнт, що узагальнює теплофізичні властивості сплаву, які постійно змінюються при затвердінні шару металу (x/R) від 0 до 1 і встановлюють по експериментальній кривій кінетики фронту твердіння.

Використання критерію $Gu = t/R^2$, який змінюється при затвердінні металу у виливку від 0 до 1 R , принципово відрізняється від рівняння квадратного кореня [7,8], у якому коефіцієнт твердіння постійний на протязі твердіння виливку:

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

де k – коефіцієнт твердіння; R – радіус виливку

Причому, значення коефіцієнта твердіння (k) для виливків зі сталі у всьому діапазоні хімічних складів дорівнює 0,30-0,35 см/с^{0,5}, а для чавунних виливків – 0,25-0,30 см/с^{0,5} [8].

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. Так, в [2] використовували циліндричну виливницю із сірого чавуну. Але товщина чавунного кокілю або виливниці δ_k при виробництві прокатних валків та злитків циліндричної форми приймається всіма дослідниками за емпіричною формулою, яка встановлена за результатами численних досліджень і забезпечує високу термостійкість кокілю в процесі експлуатації [9]:

$$\delta_k = 0,18 D_B + \Delta h, \quad (4)$$

де D_B – діаметр виливка, мм;

Δh – технологічний припуск на переточку, який дорівнює 80...120 мм.

Розроблену Б.Б. Гуляєвим методику успішно використовували чеські вчені наукової школи М.І.

Хворінова ще в середині XX століття, потім В.В. Назаратін, П.Ф. Василевський, на кафедрі ливарного виробництва НМетАУ і підтвердили доціль-

ність використання термографічних вимірів в координатах x/R і t/R^2 для інженерних розрахунків твердіння виливків різних розмірів.

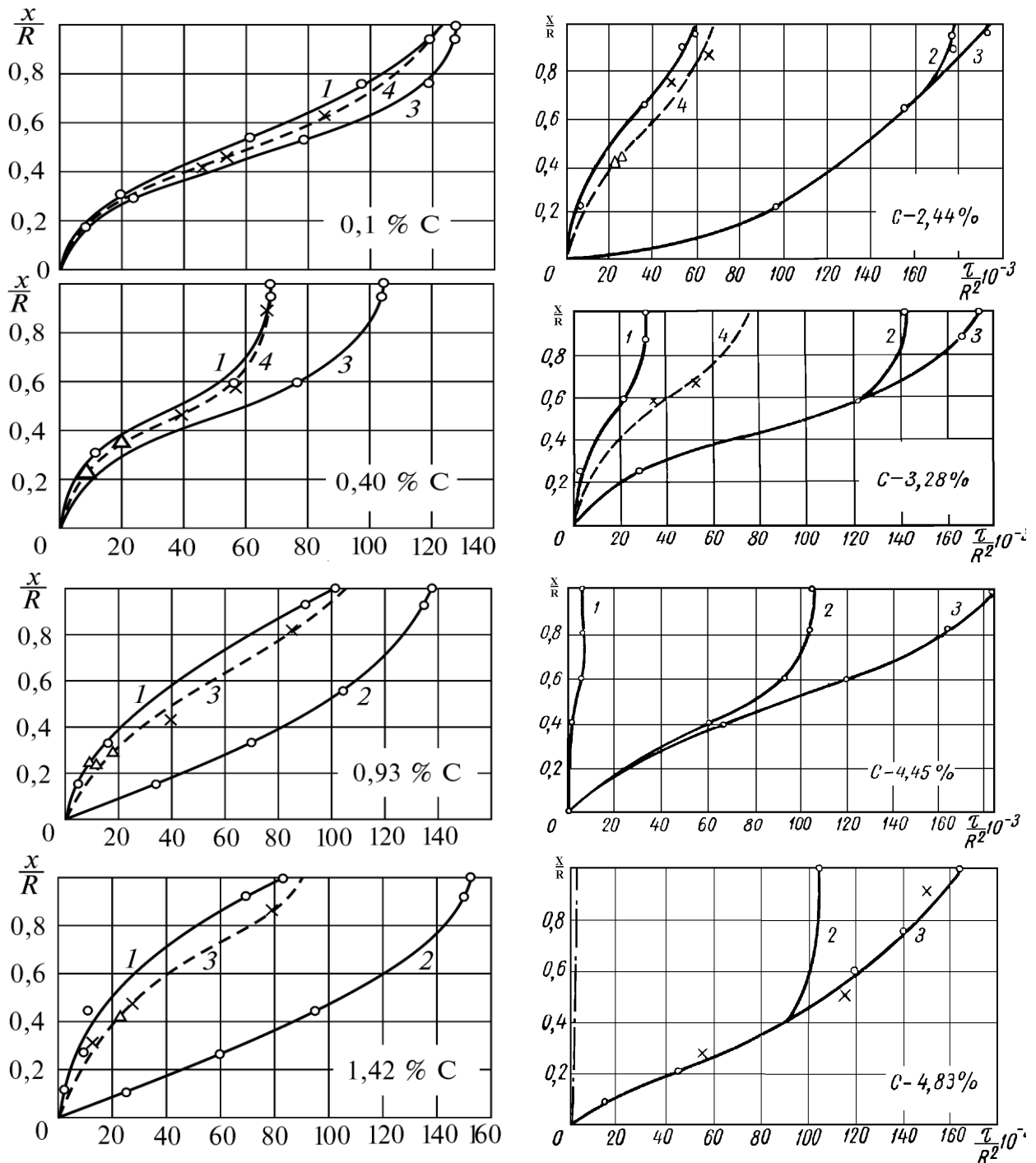


Рис. 1. Експериментальні криві кінетики твердіння в копілі циліндричних виливків зі сплавів Fe-C, %: 0,1; 0,4; 0,93; 1,42; 2,44; 3,28; 4,45; 4,83 [7]: 1 – кінетика переміщення межі ліквідус; 2 – кінетика переміщення межі початку "стояння" солідус; 3 – кінетика переміщення межі закінчення "стояння" солідус; 4 – кінетика переміщення межі виливання; o – вимір температури; x – виливання; Δ – введення індикатору; $t/R^2 \cdot 10^{-3}$, хв/см² – параметричний критерій Б.Б. Гуляєва; x/R – відносна товщина металу, що твердіє

Результати дослідження.

В процесі оцифровки і інтерполяції експериментальних термографічних досліджень (див. рис. 1) отримано (рис. 2) 20 кривих затвердіння кордону

ліквідус з кроком по відносному розміру виливку 0,05 x/R і з кроком по вмісту вуглецю 0,05% C в інтервалі хімічних складів 0,04 ... 4,83% C.

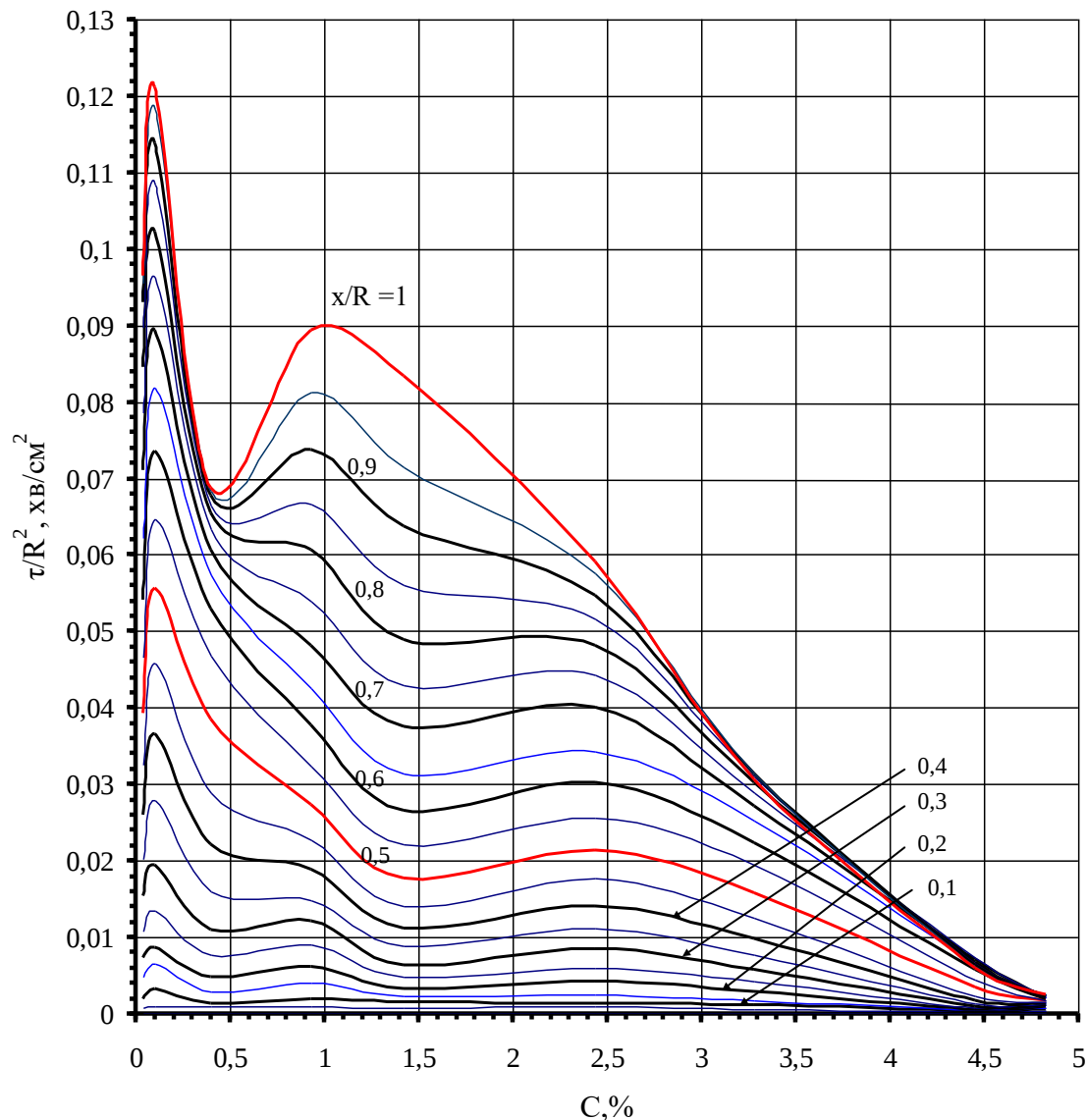


Рис. 2. Вплив вмісту вуглецю на параметричний критерій Б.Б.Гуляєва (τ/R^2) процесу твердіння фронту ліквідус у сплавах Fe-C в діапазоні 0,04...4,83 %C при охолодженні в кокілі: τ – час, хв; R – радіус циліндричного виливка, см; x/R – відносна товщина виливку

Максимальна тривалість твердіння (τ_L) при температурі ліквідус виливків зі сплавів Fe-C встановлено для вмісту вуглецю $\approx 0,1\%$:

$$\tau_{L-0,1C} = 12,11 \cdot 10^{-2} \cdot R^2 \quad (5)$$

Наприклад, для виливку діаметром 450 мм ($R = 22,5$ см) $\tau_{L-0,1C} = 61,3$ хв.

При мінімальній кількості вуглецю 0,04% тривалість затвердіння розраховували по (6) і становить $\tau_{L-0,04C} = 48,8$ хв при $R = 22,5$ см.

$$\tau_{L-0,04C} = 9,64 \cdot 10^{-2} \cdot R^2 \quad (6)$$

Для розрахунку максимальної тривалості твердіння ліквідус (τ_L) в центрі циліндричного виливку ($x/R = 1$) наведені дані по іншим реперним точкам експериментальних термографічних вимірів:

$$\tau_{L-0,4C} = 6,87 \cdot 10^{-2} \cdot R^2; \text{ при } R = 22,5 \text{ см, } \tau_{L-0,4C} = 34,8 \text{ хв} \quad (7)$$

$$\tau_{S-0,93C} = 8,93 \cdot 10^{-2} \cdot R^2; \text{ при } R = 22,5 \text{ см, } \tau_{S-0,93C} = 45,2 \text{ хв} \quad (8)$$

$$\tau_{S-1,42C} = 8,34 \cdot 10^{-2} \cdot R^2; \text{ при } R = 22,5 \text{ см, } \tau_{S-1,42C} = 42,2 \text{ хв} \quad (9)$$

$$\tau_{S-2,44C} = 5,92 \cdot 10^{-2} \cdot R^2; \text{ при } R = 22,5 \text{ см, } \tau_{S-2,44C} = 30,0 \text{ хв} \quad (10)$$

$$\tau_{S-3,28C} = 3,06 \cdot 10^{-2} \cdot R^2; \text{ при } R = 22,5 \text{ см, } \tau_{S-3,28C} = 15,5 \text{ хв} \quad (11)$$

$$\tau_{S-4,45C} = 0,59 \cdot 10^{-2} \cdot R^2; \text{ при } R = 22,5 \text{ см, } \tau_{S-4,45C} = 3,0 \text{ хв} \quad (12)$$

$$\tau_{S-4,83C} = 0,26 \cdot 10^{-2} \cdot R^2; \text{ при } R = 22,5 \text{ см, } \tau_{S-4,83C} = 1,3 \text{ хв} \quad (13)$$

Пояснити максимальну тривалість твердіння при 0,1% вуглецю можливо при врахуванні відомих даних кількості твердої фази (m , %), що виділяється при температурі на 5°C нижче ліквідус за правилом важеля [10]. В сплавах з низьким вмістом вуглецю (рис. 3) вже поблизу температури ліквідус випадає $\approx 60\%$ твердої фази. Але вже при невели-

кому підвищенні вмісту вуглецю у межах перитектичних складів, кількість твердої фази різко зменшується. Так, в сплавах з 0,30 – 0,45% С кількість твердої фази дорівнює 6 – 7%. Тому такі сплави мають кращу рідкотекучість, а при їх литті дефектів у виливках значно менше ніж у виливках з $\approx 0,1\%$ С.

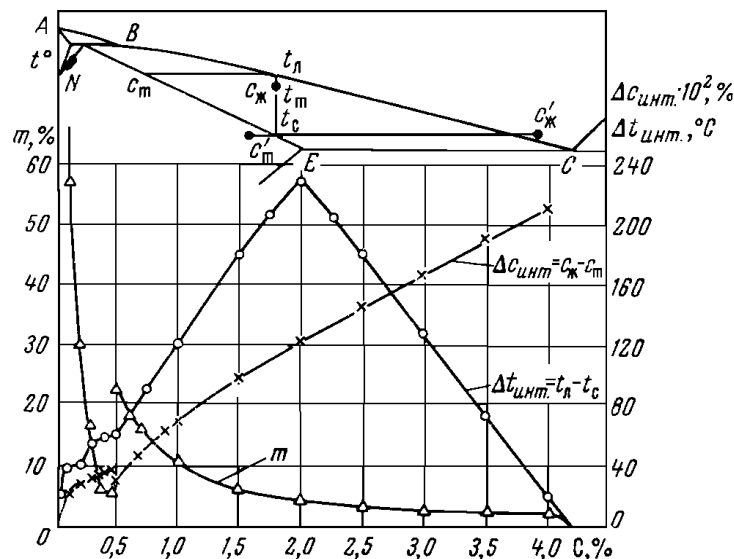


Рис. 3. Зміна кількості твердої фази $m = T/(T+Ж)$ при температурі на 5°C нижче ліквідус, температурного $\Delta t_{шнт}$ і концентраційного $\Delta C_{шнт}$ інтервалів твердіння в залежності від вмісту вуглецю у сплаві Fe-C [10]

При збільшенні вмісту вуглецю від сталей до евтектичних чавунів кількість твердої фази при температурі на 5°C нижче ліквідус зменшується. Так, відповідно до цих даних чавуни з вуглецевим еквівалентом більше 3,5 містять лише 2 - 3% твердої фази (див. рис. 3) і мають найбільш високу рідко текучість. Експериментальні криві охолодження також фіксують у чавунів незначну температурну зупинку на кривій охолодження при температурі ліквідус і велику – при солідус [11]. Тому виділення більшої частини прихованої теплоти кристалізації відбувається при температурі солідус і загальна тривалість твердіння 100% твердої фази у чавунів значно більше ніж у сталі [6], а ливарні властивості доевтектичних і евтектичних чавунів значно вищі, ніж у сталі.

За отриманими даними (див. рис. 2) можливо також побудувати кінетику просування фронту ліквідус по товщині виливку для сплавів Fe-C по 20 точкам з інтервалом 0,05% С, а за гіпотезою приведеної товщини М.І. Хворінова [12] перерахувати встановлену тривалість твердіння циліндричних виливків ($\tau_{ц}$) для виливків у формі куля ($\tau_{к}$) і плита ($\tau_{п}$) по співвідношенню:

$$\tau_{п} : \tau_{ц} : \tau_{к} = 1 : 0,25 : 0,11 \quad (14)$$

Висновки.

Виконано оцифровку дев'яти експериментальних термографічних досліджень твердіння Fe-C сплавів в кокілі циліндричних виливків з вмістом вуглецю 0,04%, 0,1%, 0,4%, 0,93%, 1,42%; 2,44%,

3,28%, 4,45%, 4,83%, які наведені в роботах Б.Б. Гуляєва, О.Н. Магницького, Л.М. Постнова та інших.

Результати оцифровки в координатах відносної товщини затверділого шару металу x/R і параметричному критерію t/R^2 інтерполювали на весь діапазон хімічних складів 0,04 ... 4,83% С, що дозволило встановити тривалість твердіння фронту ізоліквідус у виливках, що охолоджуються у кокілях. Наведено приклади розрахунку тривалості твердіння циліндричних виливків різних хімічних складів

Максимальна тривалість твердіння при 0,1 % С обумовлена виділенням високої кількості твердої фази $\approx 60\%$ поблизу температури ліквідус, а при 0,4% вуглецю зменшення тривалості твердіння можливо пояснити зменшенням кількості твердої фази до $\approx 7\%$. Ще менша тривалість твердіння при температурі ліквідус у чавунів. Так, при 3,5% вуглецю виділяється лише 2 - 3% твердої фази. Експериментальні криві охолодження також фіксують у чавунів незначну температурну зупинку на кривій охолодження при температурі ліквідус і велику – при солідус. Тому виділення більшої частини прихованої теплоти кристалізації відбувається при температурі солідус і загальна тривалість твердіння 100% твердої фази у чавунів більша, а ливарні властивості доевтектичних і евтектичних чавунів значно вищі, ніж у сталі.

Список літератури

1. ДСТУ 9051:2020. Виливки з чавуну і сталі. Дефекти. Терміни та визначення. Начало дії 01.04.2021. 15 с. <https://ptima.kiev.ua/images/stories/Standart/IRONSTEEL/dstu19200-80.pdf>.
2. Menyailo, E. V. Shrinkage Defects Elimination Methods in the Bottom Necks of Cast Iron Rolls. *Metallurgical and Mining Industry*, 2010, Vol. 2, No. 6. p. 397–400. <https://www.metaljournal.com.ua/assets/Uploads/attachments/Menailo397.pdf>. Scopus.
3. 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. https://foundry.kpi.ua/wp-content/uploads/2020/03/maksym_fesenko.pdf. Scopus.
4. Yamshinskij, M., Fedorov, G., Verkhovliuk, A. The development of new casting alloys intended for operation under extreme conditions and some techniques of making castings from them. «EUREKA: Physical Sciences and Engineering». 2016, №2(3), 51-60 с. <https://foundry.kpi.ua/wp-content/uploads/2020/03/33-175-1-pb.pdf>. Scopus.
5. Selivorstova, T., Selivorstov, V., Guda, A., & Ostrovska, K. Thermodynamic Fundamentals of Cellular Automata Model of the Process of Solidification of Metals and Alloys Considering the Phase Transition, ICT&ES-2020: Information-Communication Technologies & Embedded Systems, November 12, 2020, Mykolaiv, Ukraine, 2762, p.149-161. <http://ceur-ws.org/Vol-2762/paper10.pdf>. Scopus.
6. 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>
7. Гуляев Б.Б. (). Литейные процессы. Москва-Ленинград: Машгиз. 1960. 416 с.
8. Лейбензон В.О., Пілюшенко В.Л., Кондратенко В.М., Хричиков В.Є., Недопьокін Ф.В., Білоусов В.В., Дмитрієв Ю.В. Твердження 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
9. Справочник по чугуному литью / Под ред. Н.Г. Гиршовича. 3-е изд. -Л.: Машиностроение. 1978. 758 с.
10. Нехендзи Ю.А. Литейные свойства сплавов. Тр. XI сов. по теории литейных процессов / Литейные свойства металлов и сплавов. М., Наука, 1967, 25-38 с.
11. Хрычиков В.Е. Термокинетические условия образования усадочных дефектов в чугунных прокатных валах. Процессы лиття. 1996, № 1, 24-31 с.
12. Хворинов Н.И. Кристаллизация и неоднородность стали. Москва: перевод с чешского. Машгиз. 1958. 392 с.

References

1. DSTU 9051:2020. Castings of cast iron and steel. Defects. Terms and definitions. Since 01.04.2021. Pg. 15. <http://ptima.kiev.ua/images/stories/Standart/IRONSTEEL/dstu19200-80.pdf>.
2. Menyailo, E. V. Shrinkage Defects Elimination Methods in the Bottom Necks of Cast Iron Rolls. *Metallurgical and Mining Industry*. 2010, Vol. 2, No. 6. 397–400 pg. <https://www.metaljournal.com.ua/assets/Uploads/attachments/Menailo397.pdf>. Scopus.
3. 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 pg. https://foundry.kpi.ua/wp-content/uploads/2020/03/maksym_fesenko.pdf. Scopus.
4. Yamshinskij, M., Fedorov, G., Verkhovliuk, A. The development of new casting alloys intended for operation under extreme conditions and some techniques of making castings from them. «EUREKA: Physical Sciences and Engineering». 2016, №2(3), 51-60 pg. <https://foundry.kpi.ua/wp-content/uploads/2020/03/33-175-1-pb.pdf>. Scopus.
5. Selivorstova, T., Selivorstov, V., Guda, A., & Ostrovska, K. Thermodynamic Fundamentals of Cellular Automata Model of the Process of Solidification of Metals and Alloys Considering the Phase Transition, ICT&ES-2020: Information-Communication Technologies & Embedded Systems, November 12, 2020, Mykolaiv, Ukraine, 2762, 149-161 pg. <http://ceur-ws.org/Vol-2762/paper10.pdf>. Scopus.
6. Semenov A. D., Khrychikov V. E., Kutsova V. Z., Menailo H. V. Calculation of the kinetics of the crystallization front of iron-carbon alloys in mold cylindrical forms. Casting processes. 2021, № 2 (144). 31-38 pg. <https://doi.org/10.15407/plit2021.02.023>
7. Ghuljaev B.B. Casting processes. Moskva-Lenynghrad: Mashghyz, 1960. 416 pg.
8. Leibenzon V.O., Pilyushenko V.L., Kondratenko V.M., Khrychikov V.E., Nedopyokin F.V., Bilousov V.V. Dmitriev Yu.V. Hardening of metals and metal compositions. Kyiv: Scientific thought. 2009. 447 pg. https://nmetau.edu.ua/file/tverdinnya_metaliv_i_metalevih_kompozitsiy_pidruchnik.pdf
9. Spravochnyk po chughunnomu lytiju. Kollek. Monoghr, red. Ghyrshovych, N.Gh. Lenynghrad: Mashynostroenye/ 1978. 758 pg.
10. Nehendzi Yu.A. Casting properties of alloys. Tr. XI owl. on the theory of foundry processes / Casting properties of metals and alloys. Moscow, Nauka, 1967, pp. 25-38
11. Khrychikov V.E. Thermokinetic conditions for the formation of shrinkage defects in cast iron rolls. casting processes. 1996, No. 1, pp. 24-31.
12. Khvorynov N.Y. Krystallyzacyja y neodnorodnostj staly. Moskva: perevod s cheshskogho. Mashghyz. 1958. 392 pg.