

Формування литої структури у зв'язку з температурно-часовими параметрами плавлення і кристалізації

С. Є. Кондратюк, доктор технічних наук, професор, завідувач відділу

А. С. Нурадінюв, доктор технічних наук, провідний науковий співробітник,
nla73@ukr.net

Ж. В. Пархомчук, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,
zhanna.mom@ptima.kiev.ua

В. І. Вейс, провідний інженер

Методом фізичного моделювання з використанням прозорого модельного матеріалу (камфен 90 % + трициклен 10 %) досліджено вплив температури перегріву розплаву над рівноважним ліквідусом і швидкості охолодження його під час кристалізації, вплив температури ізотермічної обробки розплаву у передкристалізаційний період і в температурному інтервалі кристалізації за умов нормального і швидкісного тепловідбору на процеси формування литої структури. Встановлено, що утворення грубозернистої структури при значному перегріві розплаву може бути усунено швидкісним його охолодженням при кристалізації, що забезпечує формування дрібнозернистої структури з високою дисперсністю дендритної будови. Показано, що у вузькому інтервалі температур підліквідусній області під час ізотермічної обробки розплаву утворюються і накопичуються кристали твердої фази без суттєвого збільшення їх розмірів, забезпечуючи формування дисперсної литої структури при наступному швидкісному охолодженні розплаву.

Ключові слова: *фізичне моделювання, ліквідус, температура перегріву, кристалізація, структуроутворення, ізотермічна обробка.*

Формування фазово-структурного стану і властивостей литих виробів визначається температурно-часовими умовами обробки металу на всіх технологічних етапах їх виготовлення – плавлення, обробки розплаву перед розливкою, кристалізації, структуроутворення і твердофазних перетворень при остиганні або термічній обробці виливків. На кожному з цих етапів можуть бути реалізовані додаткові резерви підвищення механічних і експлуатаційних властивостей литих виробів за рахунок цілеспрямованого ефективного використання впливу на структуроутворення основних технологічних параметрів ливарних технологій, зокрема температури і швидкості охолодження розплаву під час кристалізації, термочасової обробки

* Публікація містить результати досліджень, проведених за грантом Президента України за конкурсним проектом Ф82/44272.

Плавлення і кристалізація

його у передкристалізаційний період та в інтервалі температур твердорідкого стану [1-4].

Виходячи з цього, а також у зв'язку з відсутністю системних досліджень у цьому напрямі, метою даної роботи було встановлення основних закономірностей формування литої структури залежно від термодинамічних параметрів обробки і кристалізації розплаву.

Вирішення цієї задачі при виробництві сталевих виливків пов'язано з необхідністю проведення великої кількості експериментів з рідким металом для виявлення закономірностей його кристалізації і структуроутворення у зв'язку з впливом термодинамічних параметрів цих процесів – температури перегріву розплаву над рівноважним ліквідусом, тривалості його ізотермічної обробки у передкристалізаційний період, швидкості його охолодження при кристалізації тощо. Пов'язані з цим теоретичні уявлення і технологічні параметри щодо процесів формування прогнозованих структурних характеристик можуть бути успішно розширені і визначені засобами фізичного моделювання з використанням прозорих модельних матеріалів [5-8].

В наших експериментах в якості модельного матеріалу використовували сплав камфену (90 %) з трицикленом (10 %). Розплав заливали у спеціальну форму з прозорими стінками, яка забезпечувала різні регламентовані режими його охолодження при кристалізації і дозволяла спостерігати зародження центрів кристалізації і формування литої структури у заданих умовах. Температурно-часові параметри при проведенні експериментів вибирали відповідно до існуючих методик моделювання процесів кристалізації сталей, зокрема для сталі 45Л.

На першому етапі експериментів досліджували вплив температури перегріву розплаву над рівноважним ліквідусом і швидкості його охолодження в інтервалі температур кристалізації на характеристики литої структури. Моделюючи сталь матеріал з температурами ліквідусу $T_L=42\text{ }^\circ\text{C}$ і солідусу $T_S=39\text{ }^\circ\text{C}$ перегрівали до різних температур в інтервалі 44...50 $^\circ\text{C}$, що відповідає перегріву розплаву сталі в інтервалі 40...160 $^\circ\text{C}$. Швидкість охолодження ($V_{\text{ох}}$) моделюючого матеріалу дорівнювала 45, 75 і 95 $^\circ\text{C}/\text{хв}$, що відповідає швидкості охолодження розплаву сталі 5, 100 і 350 $^\circ\text{C}/\text{с}$.

Встановлено, що за однакової невисокої швидкості охолодження ($V_{\text{ох}}=45\text{ }^\circ\text{C}/\text{хв}$) розплаву при підвищенні температури його перегріву і переходу у більш рівноважний стан спостерігається суттєве збільшення розмірів кристалів литої структури (рис. 1) зумовлене зменшенням інтенсивності і швидкості зародкоутворення та переважаючим за цих умов ростом кристалів при кристалізації. Це узгоджується з визначеним практикою ливарного виробництва рекомендованим інтервалом температур розливу розплавів сталей з перевищенням рівноважного ліквідусу не більше 30-50 $^\circ\text{C}$, оскільки за вищих температур перегріву розмір зерна у виливках збільшується і спостерігається збагачення міжзеренних границь і міждендритних ділянок окрихчучими неметалевими фазами [9].

Підвищення швидкості охолодження розплаву під час кристалізації, в наших експериментах до 75 $^\circ\text{C}/\text{хв}$ і 95 $^\circ\text{C}/\text{хв}$, призводить до закономірного

Плавлення і кристалізація

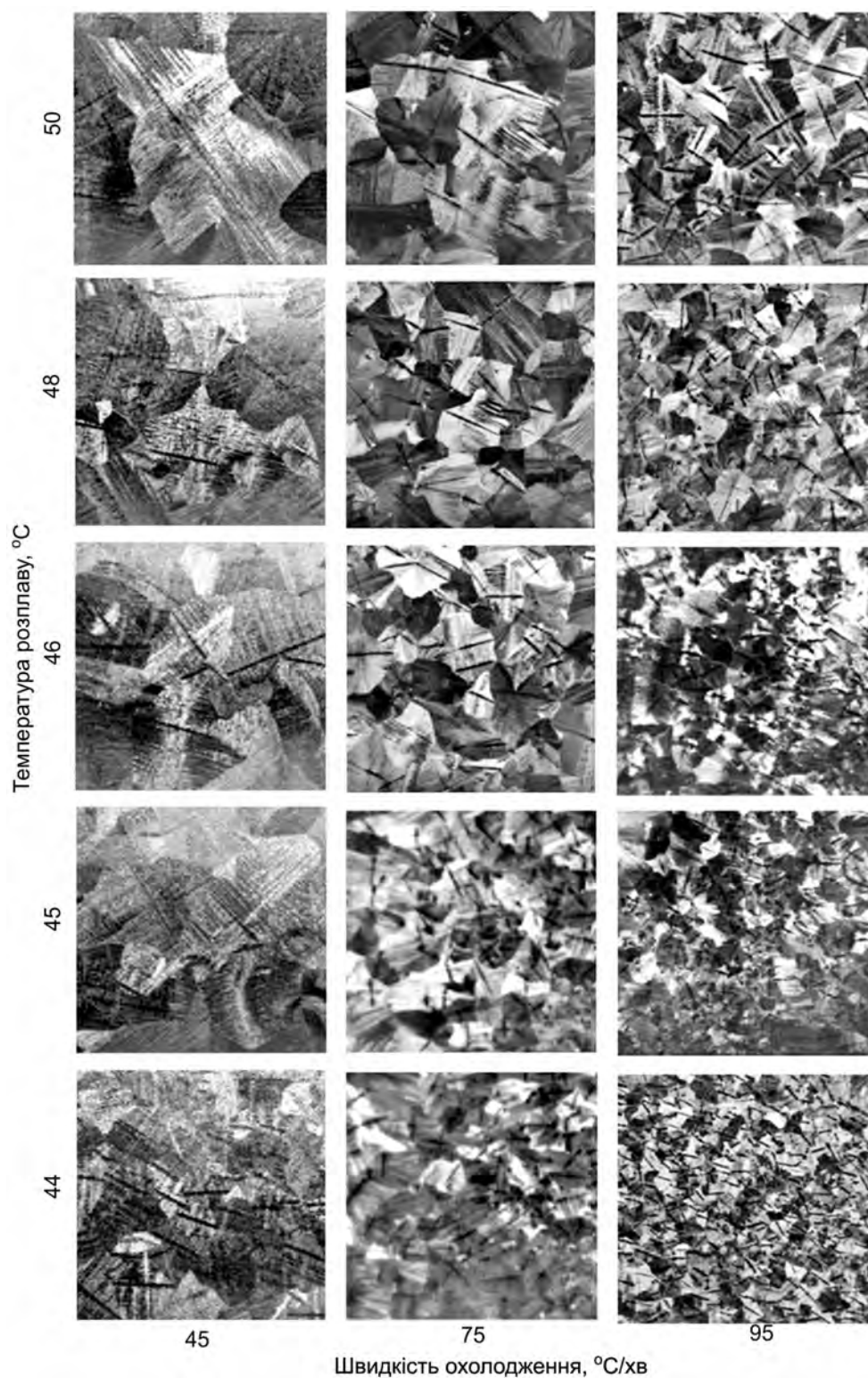


Рис. 1. Трансформація структури модельного матеріалу залежно від температури розплаву і швидкості охолодження при кристалізації. $\times 5$.

Плавлення і кристалізація

і суттєвого подрібнення у 2-3 рази литої структури за всіх досліджуваних ступенів перегріву розплаву у зв'язку з утворенням більшої кількості зародків кристалізації в умовах значного переохолодження і формування за цих умов більш нерівноважного фазово-структурного стану модельного матеріалу.

Встановлені закономірності впливу досліджуваних термодинамічних параметрів (температури і швидкості охолодження розплаву) на формування зеренної структури зумовлюють також відповідні зміни дендритної будови сплаву (рис. 2). Так, при максимальному перегріві розплаву модельного матеріалу до 50 °С і низькій швидкості його охолодження ($V_{ox}=45$ °С/хв) при кристалізації спостерігається зменшення показника дисперсності дендритної структури (ДДС) на 20 % (табл. 1). При підвищенні ж швидкості охолодження розплаву, що кристалізується, рівень значень цього показника,

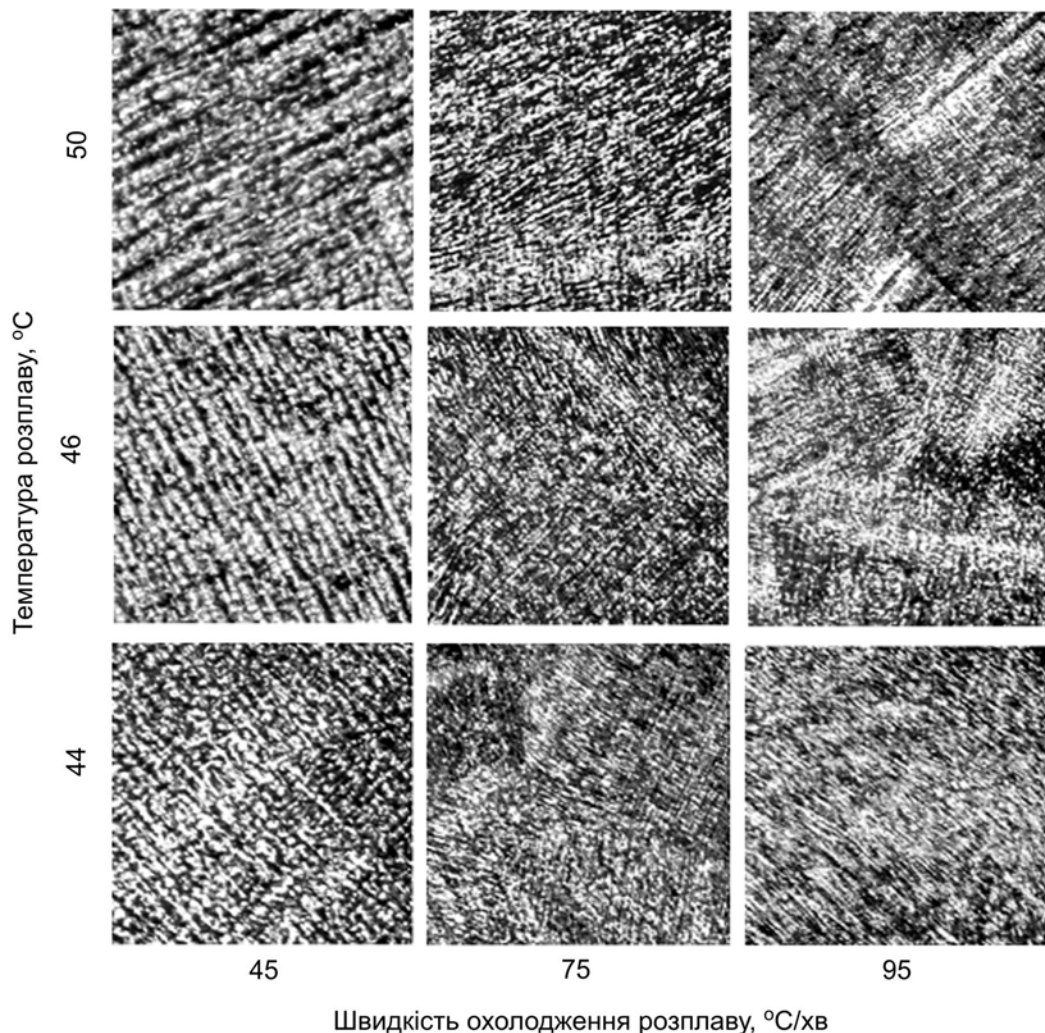


Рис. 2. Дендритна структура модельного матеріалу залежно від температури розплаву і швидкості охолодження при кристалізації. $\times 100$.

Плавлення і кристалізація

Таблиця 1
Дисперсність дендритної структури (мм^{-1}) модельного матеріалу залежно від температури розплаву і швидкості охолодження при кристалізації

Температура розплаву, °C	Швидкість охолодження, °C/хв		
	45	75	95
50	50	66	76
48	52	70	80
46	54	72	85
45	58	76	88
44	62	80	92

як суми значень кількості осей і міжосних ділянок на одиницю довжини [10], зростає на 33-35 % для всіх досліджуваних температур перегріву розплаву. Результати цих досліджень свідчать про те, що подрібнення литої структури при кристалізації перегрітого розплаву може бути реалізовано лише за високих швидкостей тепловідбору, тобто при значному підвищенні його переохолодження [11].

При дослідженні впливу термочасових параметрів слід враховувати також тривалість високотемпературної обробки розплаву. В роботах [12-14] показано, що така «термочасова» обробка розплаву протягом 15-20 хвилин сприяє підвищенню ступеня рівноважності перегрітого розплаву, зумовлюючи підвищення якості і показників пластичності сталей. Перегрітий розплав при цьому охолоджують перед кристалізацією до нормальної температури розливки.

Що ж до можливостей використання ізотермічної обробки (ІЗО) в інтервалі температур твердо-рідкого стану для цілеспрямованого впливу на процеси структуроутворення слід звернутись до уявлень Г. Таммана стосовно залежності числа зародків кристалізації і швидкості їх росту від ступеня переохолодження розплаву. Виходячи з цього, слід очікувати, що максимум утворення центрів кристалізації має місце за умов дещо меншого переохолодження ніж при максимумі їх росту – при температурах, близьких до середини інтервалу між ліквідусом і солідусом.

Виходячи з цього, досліджено вплив ізотермічної обробки (20 хв) модельного розплаву в інтервалі цих температур 41...44 °C і наступної кристалізації за умов різної інтенсивності тепловідбору при V_{ox} 45, 75 і 95 °C/хв.

В разі проведення вказаної ізотермічної обробки розплаву у надліквідусній області температур спостерігається суттєве збільшення у 1,5-2 рази розмірів кристалів (зерен) у структурі модельного матеріалу за всіх досліджуваних швидкостей охолодження порівняно із структурами сформованими за умов безперервного охолодження при кристалізації (рис. 1, 3). Це свідчить про переважаючий процес росту кристалів над процесом їх зародкоутворення.

Можливість значного підвищення дисперсності литої структури встановлена при проведенні ізотермічної обробки розплаву в інтервалі

Плавлення і кристалізація

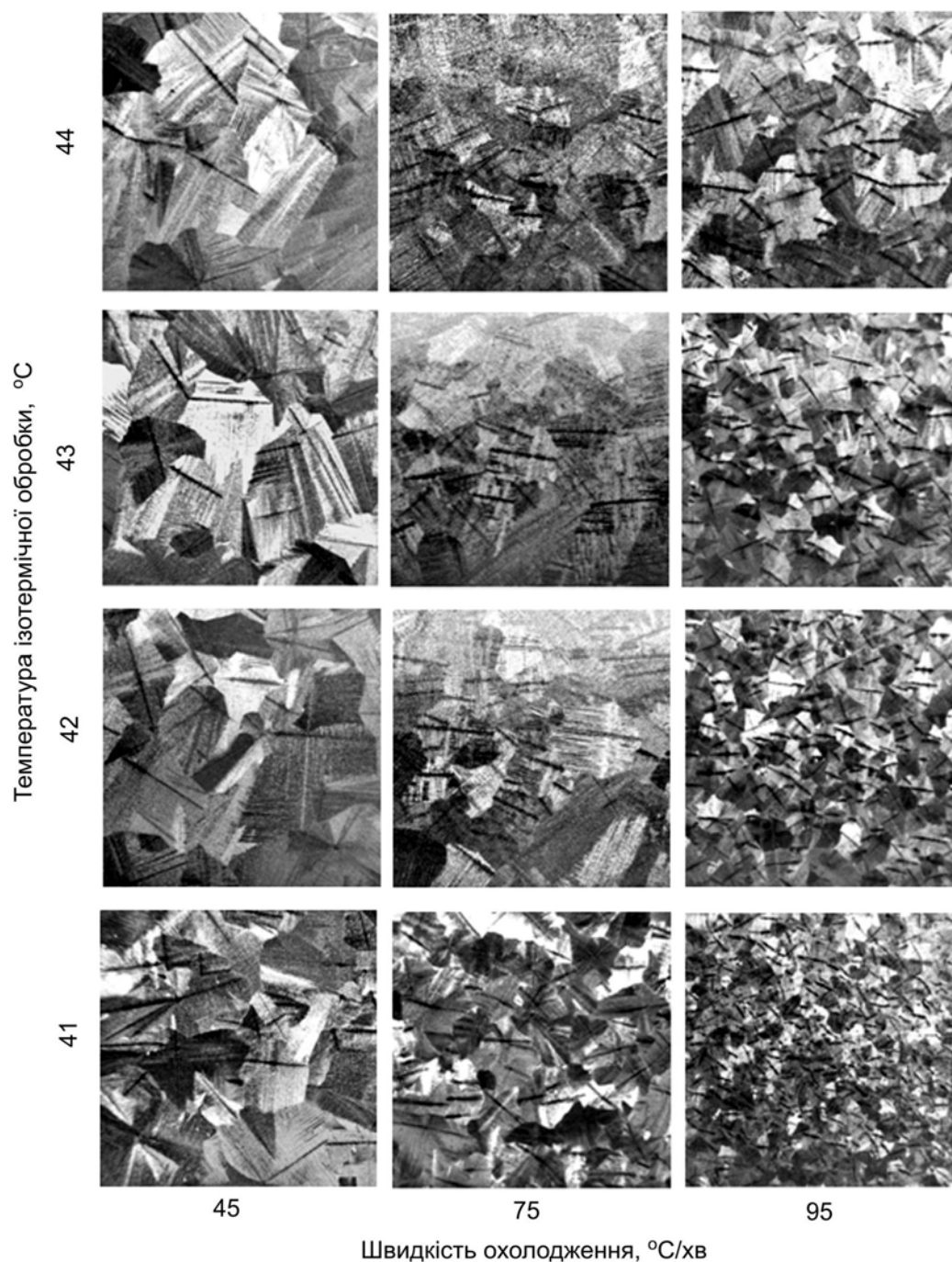


Рис. 3. Трансформація структури модельного матеріалу залежно від температури ізотермічної обробки і швидкості охолодження при кристалізації. х 5.

температур ліквідусу і підліквідусної області. В наших експериментах це 42 і 41 °С. Встановлено, що при оптимальному поєднанні температури ізотермічної обробки і високої швидкості охолодження розплаву ($V_{ox}=95$ °С/хв) реалізується процес інтенсивного утворення і накопичення

Плавлення і кристалізація

зародків кристалізації і гальмування росту кристалів, що призводить до формування однорідної високодисперсної литої структури (рис. 3).

При цьому закономірно підвищуються і характеристики дендритної будови сплаву (рис. 4). Встановлено, що дисперсність дендритної будови

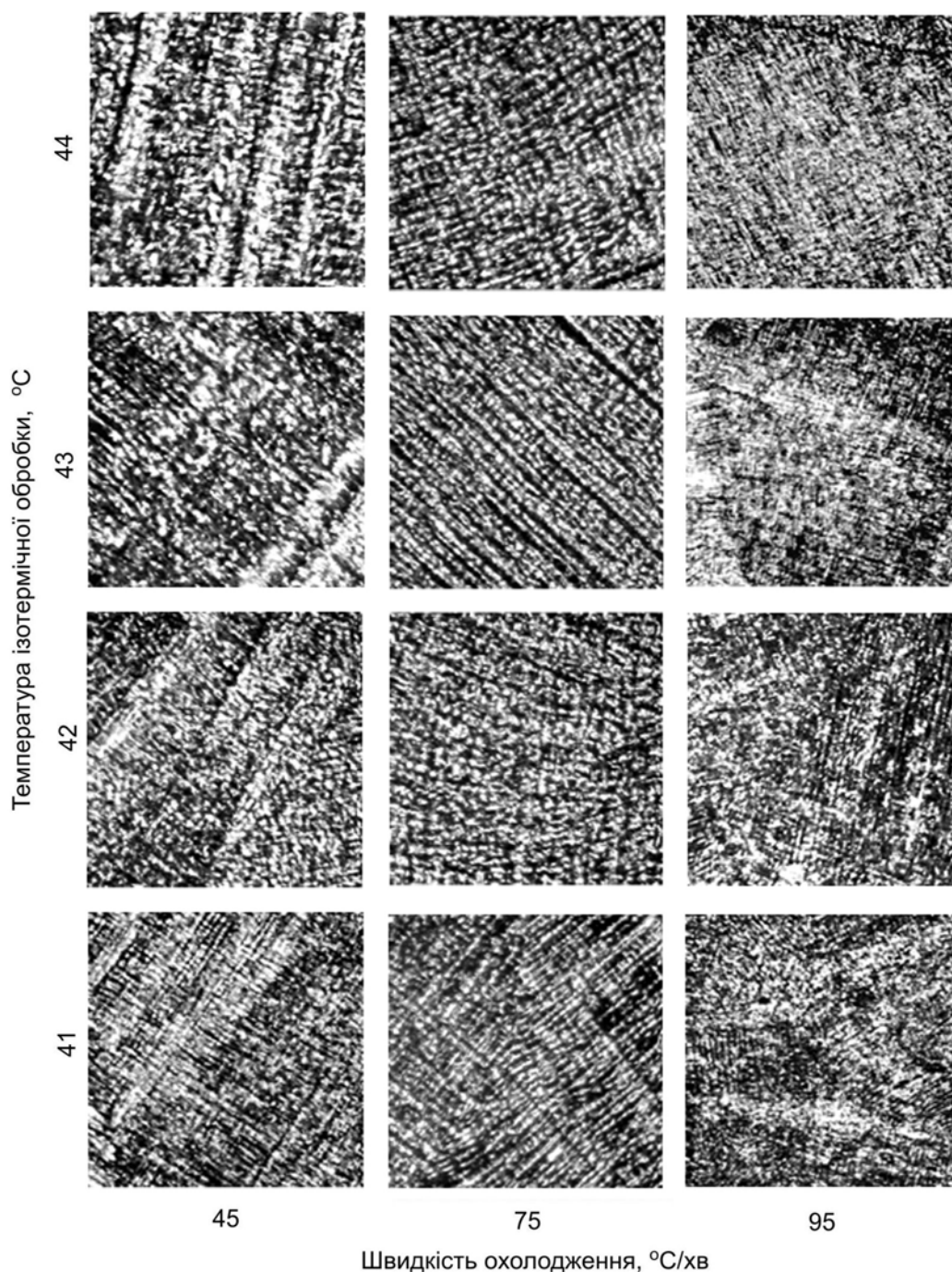


Рис. 4. Дисперсність дендритної структури модельного матеріалу залежно від температури ізотермічної обробки і швидкості охолодження при кристалізації. $\times 100$.

Плавлення і кристалізація

сплаву (ДДС), що кристалізувався за умов ізотермічної обробки розплаву у вказаному оптимальному інтервалі температур твердо-рідкого стану значно підвищується порівняно з ІЗО у надліквідусній області температур на 15-33 % відповідно підвищенню швидкості охолодження розплаву (табл. 2).

Таблиця 2

Дисперсність дендритної структури (мм^{-1}) модельного матеріалу залежно від температури ізотермічної обробки і швидкості охолодження розплаву при кристалізації

Температура розплаву, °С	Швидкість охолодження, °С/хв		
	45	75	95
44	48	54	66
43	50	58	72
42	52	62	84
41	56	66	96

Одержані результати експериментів дозволяють засвідчити можливість цілеспрямованого технологічного впливу на рідкий і тверднучий метал для забезпечення дисперсної і однорідної литої структури литих виробів.

Показано, що негативний вплив значних перегрівів розплаву, що призводить до утворення грубозернистої литої структури, може бути нівельований швидкісним охолодженням під час його кристалізації. Підвищення ступеня переохолодження при зростанні температури перегріву розплаву і високій швидкості його охолодження забезпечують суттєве подрібнення структури литих виробів.

Встановлено, що у вузькому інтервалі температур біля ліквідусу під час ізотермічної обробки розплаву, що кристалізується, утворюються і накопичуються без суттєвого збільшення розмірів кристали твердої фази, зумовлюючи формування дисперсної литої структури за умов наступного швидкісного охолодження розплаву.

Одержані результати відкривають перспективу розроблення нових ливарних технологій і одержання литих виробів з високими прогнозованими механічними і експлуатаційними властивостями.

Література

1. Флемингс М. Процессы затвердевания. – М.: Металлургия, 1977. – 424 с.
2. Овсиенко Д.Е. Зарождение и рост кристаллов из расплава. – К.: Наукова думка, 1994. – 256 с.
3. Гаврилин И.В. Плавление и кристаллизация металлов и сплавов. – Владимир: ВлГУ, 2000. – 255 с.
4. Вейник А.И. Теория затвердивания оливки. – М.: Машгиз, 1960. – 435 с.
5. Марков Б.Л., Кирсанов А.А. Физическое моделирование в металлургии. – М.: Металлургия, 1984. – 119 с.
6. Еронько С.П., Быковских С.В. Физическое моделирование процессов внепечной обработки и разливки стали. – Киев: Техника, 1998. – 136 с.

Плавлення і кристалізація

7. Эльдарханов А.С., Ефимов В.А., Нурадинов А.С. Процессы формирования отливок и их моделирование. – М.: Машиностроение, 2001. – 208 с.
8. Дымнич А.Х., Корниец И.В. Основы теории подобия и физического моделирования. – К.: ООО «Наш формат», 2016. – 172 с.
9. Кондратюк С.Є., Пархомчук Ж.В., Вейс В.І. Термокінетичні параметри обробки розплаву і структуроутворення литої сталі // Металознавство та обробка металів. – 2018. – № 4. – С. 9 – 18.
10. Бялік О.М., Кондратюк С.Є., Кіндрачук М.В., Черненко В.С. Структурний аналіз металів. Металографія, фрактографія. – К.: Політехніка, 2006. – 328 с.
11. Данилов В.И. Строение и кристаллизация жидкостей. – К.: Наукова думка, 1956. – 568 с.
12. Тягунов Г.В. Связь свойств расплава со структурой и свойствами твердого металла // Литейное производство. – 1988. – № 2. – С. 8 – 9.
13. Баум Б.А., Хасин Г.А., Тягунов Г.В. Жидкая сталь. – М.: Металлургия, 1984. – 208 с.
14. Баум Б.А., Тягунов Г.В., Барышев Е.Е., Цепелев В.С. Фундаментальные исследования физико-химии металлургических расплавов. – М.: ИКЦ Академкнига, 2002. – С. 214 – 228.

References

1. Flemings M. *Protsessy zatverdevaniya* (Hardening processes), Moskva: Metallurgiya, 1977, 424 p. [in Russian].
2. Ovsienko D.Ye. *Zarozhdeniye i rost kristal lov iz rasplava* (The born and growth of melt crystals), Kyiv: Naukova dumka, 1994, 256 p. [in Russian].
3. Gavrilin I.V. *Plavleniye i kristallizatsiya metallov i splavov* (Melting and crystallization of metals and alloys), Vladimir: VITU, 2000, 255 p. [in Russian].
4. Veynik A.I. *Teoriya zatverdivaniya olivki* (The hardening theory of olives), Moskva: Mashgiz, 1960, 435 p. [in Russian].
5. Markov B.L., Kirsanov A.A. *Fizicheskoye modelirovaniye v metallurgii* (Physical modeling in metallurgy), Moskva: Metallurgiya, 1984, 119 p. [in Russian].
6. Yeronko S.P., Bykovskikh S.V. *Fizicheskoye modelirovaniye protsessov vnepechnoy obrabotki i razlivki stali* (Physical modeling of out-of-furnace treatment and steel casting processes), Kyiv: Tekhnika, 1998, 136 p. [in Russian].
7. Eldarkhanov A.S., Yefimov V.A., Nuradinov A.S. *Protsessy formirovaniya otlivok i ikh modelirovaniye* (Casting formation processes and their modeling), Moskva: Mashinostroyeniye, 2001, 208 p. [in Russian].
8. Dymnich A.KH., Korniyets I.V. *Osnovy teorii podobiya i fizicheskogo modelirovaniya* (Fundamentals of similarity theory and physical modeling), Kyiv: ООО «Nash format», 2016, 172 p. [in Russian].
9. Kondratyuk S.Ye., Parkhomchuk Z.V., Veys V.I., *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*, 2018, No 4, pp. 9 – 18 [in Ukrainian].
10. Byalik O.M., Kondratyuk S.Ye., Kindrachuk M.V., Chernenko V.S. *Strukturnyy analiz metaliv. Metalohrafiya, fraktografiya* (Structural analysis of metals. Metallography, fractography), Kyiv: Politekhnik, 2006, 328 p. [in Ukrainian].
11. Danilov V.I. *Stroyeniye i kristallizatsiya zhidkostey* (The structure and crystallization of liquids), Kyiv: Naukova dumka, 1956, 568 p. [in Russian].
12. Tyagunov G.V. *Liteynoye proizvodstvo*, 1988, No 2, pp. 8 – 9 [in Russian].
13. Baum B.A., Khasin G.A., Tyagunov G.V. *Zhidkaya stal* (Liquid steel), Moskva: Metallurgiya, 1984, 208p. [in Russian].

14. Baum B.A., Tyagunov G.V., Baryshev Ye.Ye., Tsepelev V.S. *Fundamentalnyye issledovaniya fiziko-khimii metallurgicheskikh rasplavov* (Basic research of the physical chemistry of metallurgical melts), Moskva: IKTS Akademkniga, 2002, pp. 214 – 228. [in Russian].

Одержано 18.09.2019

С. Е. Кондратюк, А. С. Нурадинов, Ж. В. Пархомчук, В. И. Вейс

Формирования литой структуры в связи с температурно-временными параметрами плавления и кристаллизации

Резюме

Методом физического моделирования с использованием прозрачного модельного материала (камфен 90 % + трициклен 10 %) исследовано влияние температуры перегрева расплава над равновесным ликвидусом и скорости охлаждения его во время кристаллизации, а также влияние температуры изотермической обработки расплава в предкристаллизационный период и в температурном интервале кристаллизации в условиях нормального и скоростного теплоотбора на процессы формирования литой структуры. Установлено, что образование крупнозернистой структуры при значительном перегреве расплава может быть устранено скоростным его охлаждением при кристаллизации, обеспечивающий формирование мелкозернистой структуры с высокой дисперсностью дендритного строения. Показано, что в узком интервале температур в подликвидусной области во время изотермической обработки расплава образуются и накапливаются кристаллы твердой фазы без существенного увеличения их размеров, обеспечивая формирование дисперсной литой структуры при следующем скоростном охлаждении расплава.

Ключевые слова: физическое моделирование, ликвидус, температура перегрева, кристаллизация, структурообразование, изотермическая обработка.

S. Ye. Kondratyuk, A. S. Nuradinov, Z. V. Parkhomchuk, V. I. Veis

Formation of cast structure in relation to temperature and time parameters of melting and crystallization

Summary

The influence of the melt overheating temperature over the equilibrium liquidus and the cooling rate of it during crystallization, the effect of the temperature of the isothermal processing of the melt in the pre-crystallization period and in the temperature interval of crystallization under conditions of normal and high-speed thermal selection on the formation processes of cast structure was researched by methods of physical modeling using transparent model material (camphene). It has been established that the formation of a coarse-grained structure with significant overheating of the melt can be eliminated by its rapid cooling during crystallization, which ensures the formation of a fine-grained structure with a high dispersion of the dendritic structure. It is shown that in a narrow temperature range of underliquidus area during the isothermal processing solid phase crystals form and accumulate without substantially increasing their size, providing the formation of a dispersed cast structure with subsequent rapid melt cooling.

Keywords: physical modeling, liquidus, superheat temperature, crystallization, structure formation, isothermal treatment.