

Структура і властивості литих сталей у зв'язку з термодинамічними параметрами обробки і кристалізації розплаву

С. Є. Кондратюк, доктор технічних наук, професор, завідувач відділу,
stkondrat@gmail.com

В. І. Вейс, аспірант, nikusik123@yandex.ru

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

О. О. Токарева, головний математик, olgatokareva@ukr.net

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

Досліджено вплив температури перегріву розплаву сталей над рівноважним ліквідусом (20...170 °С) і швидкості охолодження при кристалізації (5...650 °С/с) на характеристики литої структури і механічні властивості конструкційних сталей 25Л, 25ХГСТФЛ, 45Л, 45ХГСТФЛ. Встановлено закономірне підвищення дисперсності їх литої структури і механічних властивостей за умов швидкого охолодження і збільшення градієнта температур під час кристалізації. Одержано, на основі результатів експериментів, інтерполяційні моделі взаємозв'язку перегріву розплаву, швидкості його охолодження та їх впливу на структуру і властивості сталей, які дозволяють прогнозувати властивості виливків в межах досліджуваного факторного простору.

Ключові слова: *сталь, розплав, кристалізація, структура, механічні властивості.*

Практикою ливарного виробництва визначено оптимальний інтервал температур розливання розплаву сталей у ливарні форми з перевищенням температури їх рівноважного ліквідусу на 30 – 50 °С. За більш високих температур перегріву розплаву при розливці суттєво збільшується розмір зерна у сталевих виливках, що виготовляються за традиційними технологіями, зумовлюючи зниження опору литої сталі крихкому руйнуванню.

Виходячи з сучасних уявлень щодо процесів плавлення, кристалізації і будови мікронеоднорідного розплаву відкриваються нові можливості цілеспрямованої зміни фазово-структурного стану і властивостей сталевих виливків за рахунок оптимізації термочасових параметрів обробки рідкого, тверднучого і твердого металу. При цьому основними технологічними засобами керування литою структурою і властивостями литих сталевих виробів є температура розплаву, тривалість його ізотермічної обробки і швидкість охолодження під час кристалізації та твердофазних перетворень [1 – 4].

Плавлення і кристалізація

Зважаючи на відсутність системних досліджень в цьому напрямі метою даної роботи було дослідження взаємного впливу температури перегріву розплаву і швидкості його охолодження (V_{ox}) під час кристалізації на формування литої структури і механічних властивостей конструкційних сталей (табл. 1).

Таблиця 1

Хімічний склад досліджуваних сталей

Сталь	Масова частка елементів, %					
	C	Mn	Si	Cr	Ti	V
25Л	0,23	0,40	0,30	-	-	-
45Л	0,46	0,80	0,45	-	-	-
25ХГСТФЛ	0,26	1,14	0,60	1,35	0,15	0,31
45ХГСТФЛ	0,46	1,12	1,30	1,50	0,18	0,43

Примітка: вміст сірки і фосфору не перевищує 0,035 та 0,025 % відповідно

Виплавку сталей здійснювали в індукційній печі типу ЛПЗ-37 з кислим тиглем, розливу проводили після ізотермічної витримки розплаву (3 хв) від температур 1520, 1570, 1620, 1670 °С в ливарні форми з різною тепловідбірною здатністю. Це забезпечувало кристалізацію і структуроутворення виливків тріфоподібних проб (ГОСТ 977-88) досліджуваних сталей при швидкостях охолодження (V_{ox}) 2 °С/с (пісчано-глиниста форма), 45 °С/с (сталевий кокіль), 350 °С/с (мідний охолоджуваний кокіль), 650 °С/с (вакуумний відбір розплаву у кварцеві трубки діаметром 5 мм).

Металографічно встановлено (рис. 1, 2), що залежно від температурно-кінетичних умов обробки розплавів і кристалізації сталей закономірно змінюються характеристики їх литої структури. Так, за невисокої швидкості охолодження розплаву сталей при кристалізації ($V_{ox} = 5$ °С/с) за перегрівів їх в межах дослідженого інтервалу температур 1520–1670 °С, розмір зерна сталі 25Л збільшується від номера -1 до -3 згідно ГОСТ 5639-82, сталі 25ХГСТФЛ від номера 2 до -1, сталі 45Л від номера -1 до -2, сталі 45ХГСТФЛ від номера 2 до -1.

З підвищенням швидкості охолодження до 45 °С/с і 350 °С/с спостерігається закономірна зміна характеру процесів кристалізації і структуроутворення, зумовлюючи відповідне подрібнення зерна перегрітої сталі за рахунок домінуючого впливу на це градієнта температур рідкої і твердої фаз та ступеня переохолодження перегрітого розплаву. Відповідно до цього в межах проведених експериментів максимальне підвищення дисперсності литої структури досягається при $V_{ox} = 350$ °С/с і перегріві розплаву до 1670 °С/с. За цих умов розмір зерна сталі 25Л зменшується до номера 6, сталі 25ХГСТФЛ до номера 10, сталі 45Л до номера 4, і сталі 45ХГСТФЛ до номера 8.

На основі обробки масиву одержаних експериментальних даних із застосуванням лінійного регресійного аналізу [5, 6] і використання пакету

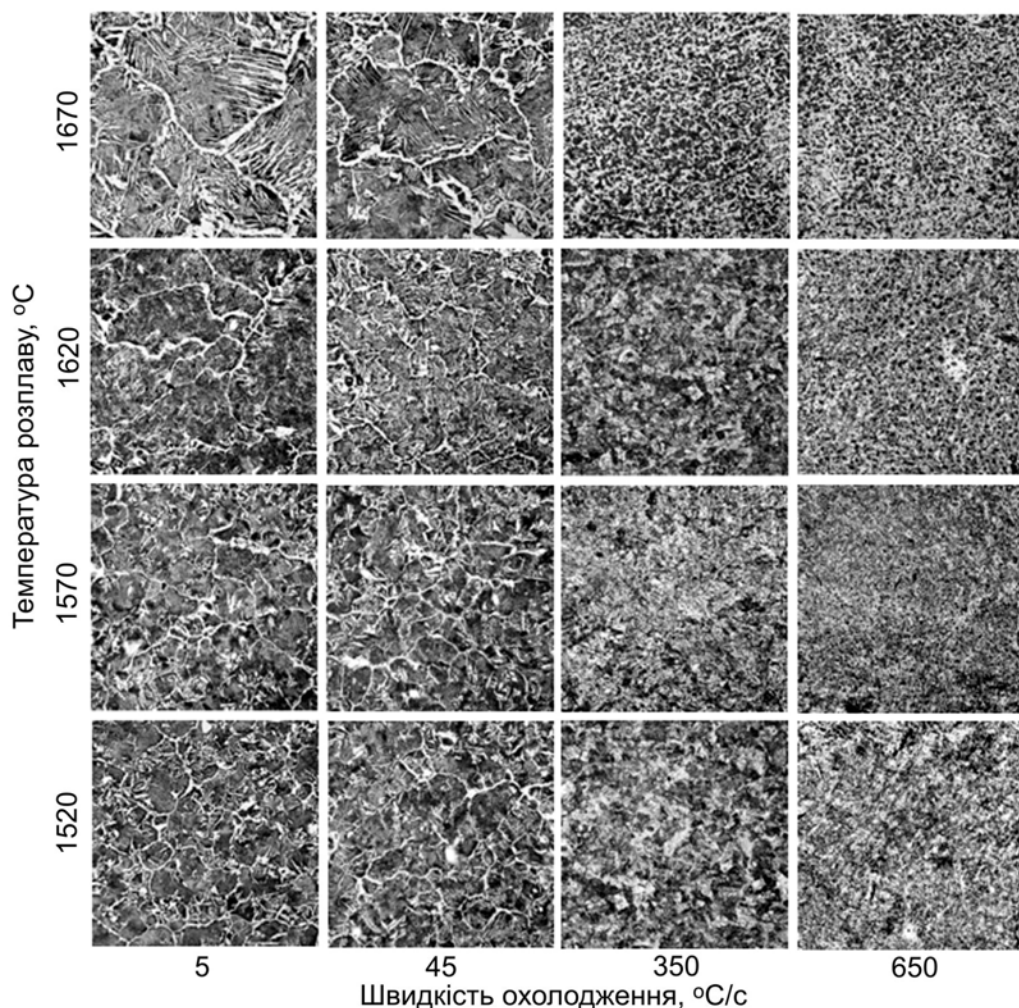


Рис. 1. Трансформація структури сталі 45Л залежно від температурно-часових умов кристалізації. $\times 100$.

прикладних програм (Statgraphics, Mathcad) одержано інтерполяційні моделі та їх графічні зображення, які дозволяють кількісно оцінити встановлені закономірності зміни характеристик структури і механічних властивостей досліджуваних сталей залежно від температури розплаву (T , °C) і швидкості його охолодження (V_{ox} , °C/c) під час кристалізації і структуроутворення.

Наведені на рис. 3 графічні інтерпретації одержаних рівнянь регресії щодо зміни розмірів зерна досліджуваних сталей свідчать про визначальний вплив швидкості охолодження на цей показник. Підвищення швидкості охолодження розплаву дозволяє нівелювати негативний вплив значного перегріву його на дисперсність литої структури. Одержані математичні моделі дозволяють визначити оптимальне поєднання температури розплаву і швидкості його охолодження при кристалізації для одержання прогнозованих високих характеристик структури у виливках сталей.

Зміна температурно-часових умов обробки розплаву і швидкості його охолодження під час кристалізації зумовлює не тільки зміну розмірів зерна

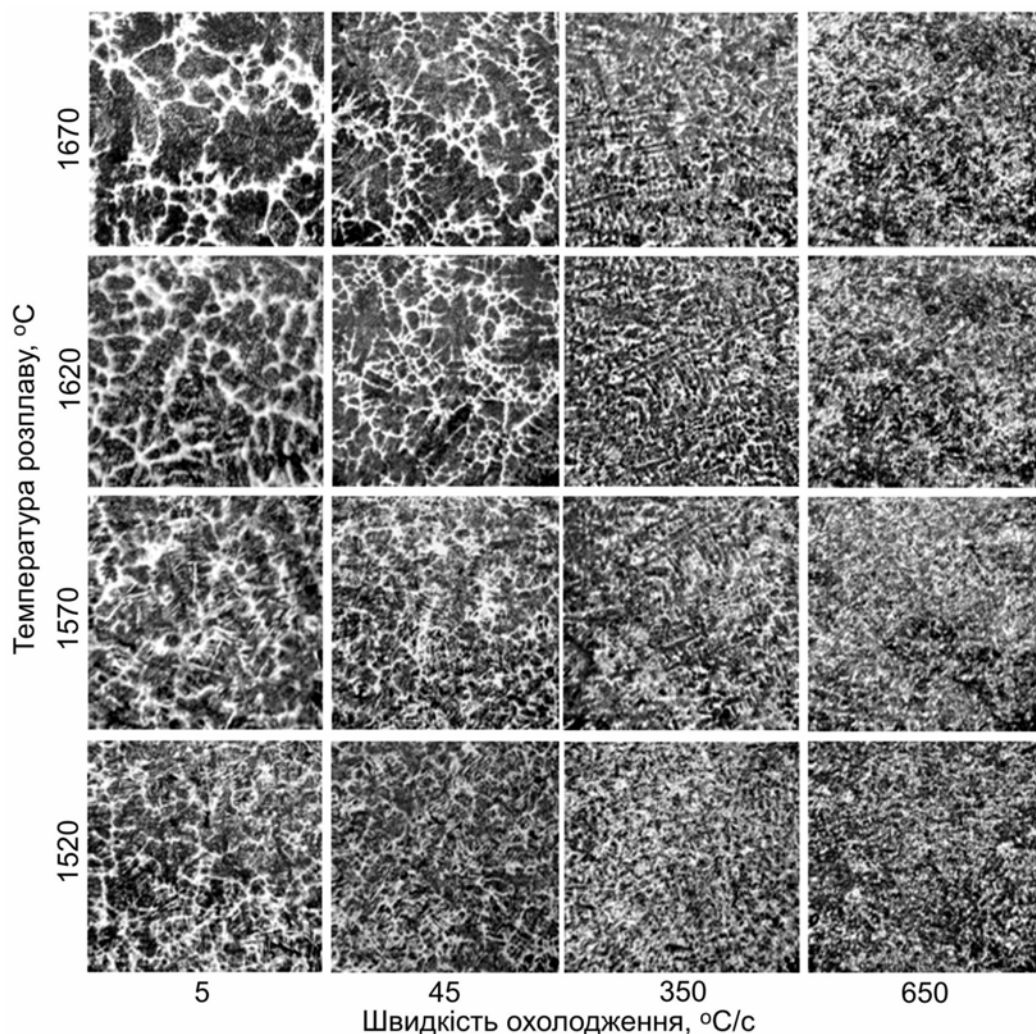


Рис. 2. Трансформація структури сталі 45ХГСТФЛ залежно від температурно-часових умов кристалізації. $\times 100$.

сталей але й зміну морфології литої структури – дендритної будови виливків (дисперсності ДДС і щільності ЩДС дендритної структури) [7]. Встановлено (табл. 2), що підвищення температури розплаву від 1520 °C до 1670 °C призводить до зниження дисперсності дендритної структури сталей в середньому на 25 – 50 % за звичайної інтенсивності тепловідбору при кристалізації ($V_{ox} = 5 \text{ }^\circ\text{C/s}$). При цьому щільність дендритної структури у дослідженому інтервалі температур перегріву розплаву знижується лише на 10 – 15 %.

З підвищенням швидкості охолодження розплаву сталей, що кристалізуються від 5 °C/s до 350 °C/s за мінімального перегріву 1520 °C, реалізується її визначальний вплив на характеристики дендритної будови сталей, що забезпечує зростання її дисперсності у 1,5 – 2,0 рази. За максимального перегріву розплаву ДДС підвищується у 2,5 – 3,0 рази відповідно до хімічного складу сталей. Показники щільності дендритної

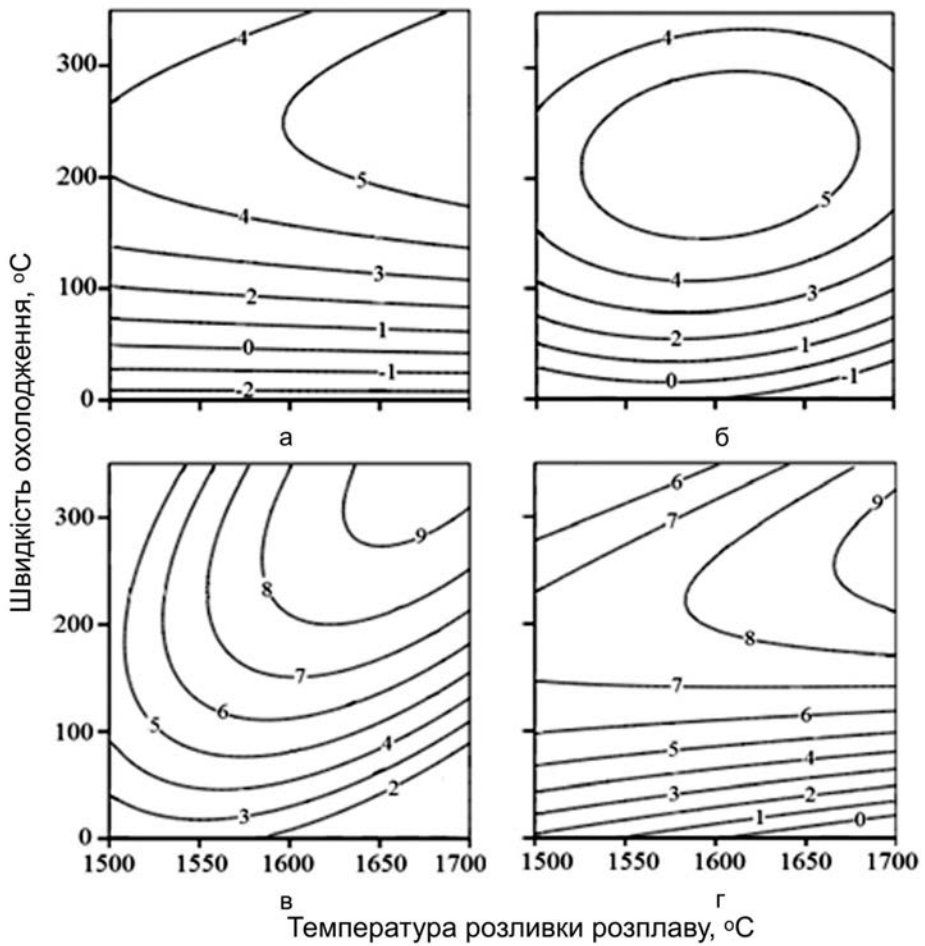


Рис. 3. Зміна розміру зерна залежно від умов кристалізації сталей. а – сталь 25Л; б – сталь 25ХГСТФЛ; в – сталь 45Л; г – сталь ХГСТФЛ.

Таблиця 2

Фізичне розширення рентгенівських ліній (110), рад · 10⁻⁴ залежно від температури розплаву і швидкості охолодження (V_{ox}) при кристалізації

Температура розплаву, °C	V_{ox} , °C/c	25Л	25ХГСТФЛ	45Л	45ХГСТФЛ
1520	5	4,4	23,4	45,0	72,5
	45	10,2	34,6	48,4	76,5
	350	11,7	54,8	60,2	94,0
1570	5	15,0	26,5	53,2	80,3
	45	18,2	38,4	66,0	88,4
	350	25,0	60,5	74,5	120,0
1620	5	12,8	20,2	48,5	70,5
	45	15,4	26,5	50,2	80,0
	350	20,2	48,2	70,4	110,2
1670	5	10,2	16,8	43,6	65,4
	45	12,6	20,4	48,0	73,0
	350	16,3	40,4	65,2	105,0

Плавлення і кристалізація

структури при цьому також закономірно зростають із підвищенням інтенсивності тепловідбору під час кристалізації виливків.

Зміна температурно-часових умов обробки розплаву, кристалізації та твердофазних $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворень призводить також до змін тонкої кристалічної будови литих сталей. Це підтверджено результатами рентгеноструктурних досліджень (табл. 3). Експериментально показано, що підвищення швидкості охолодження під час кристалізації виливків зумовлює збільшення характеристики фізичної ширини лінії (110). За всіх температур перегріву розплаву це свідчить про зменшення розміру елементів субструктури досліджуваних сталей – зон когерентного розсіювання та збільшення щільності дислокацій, найбільш суттєве при $V_{ox} = 350$ °C/c.

Таблиця 3

Характеристики дендритної структури сталей залежно від температурно-часових умов кристалізації

Сталь	Температура розплаву, °C	ДДС, мм ⁻¹			ЩДС		
		V _{ox} , °C/c			V _{ox} , °C/c		
		5	45	350	5	45	350
25Л	1520	6	7	12	0,70	0,78	1,10
	1570	7	8	14	0,75	0,86	1,20
	1620	5	8	17	0,65	0,70	1,26
	1670	3	7	22	0,60	0,65	1,32
25ХГСТФЛ	1520	30	43	65	0,76	0,92	1,36
	1570	33	52	70	0,80	0,98	1,50
	1620	28	50	82	0,68	0,96	1,58
	1670	26	48	88	0,60	0,92	1,65
45Л	1520	20	32	56	0,74	0,80	1,12
	1570	22	38	60	0,83	1,00	1,34
	1620	19	34	64	0,76	0,78	1,52
	1670	16	28	70	0,70	0,74	1,65
45ХГСТФЛ	1520	42	55	80	0,90	1,15	1,50
	1570	48	62	86	0,95	1,20	1,65
	1620	44	60	90	0,76	1,00	1,74
	1670	40	58	94	0,64	0,95	1,85

Примітка: ДДС – дисперсність і ЩДС щільність дендритної структури

Для сталі 25Л розширення лінії (110) пов'язано саме з подрібненням блоків і зростанням густоти дислокацій, оскільки вона практично не загартовується у досліджуваному інтервалі швидкості охолодження і не може бути пов'язано з утриманням у матриці вуглецю.

Підвищення ширини лінії (110) у сталі 45Л пов'язано із збільшенням викривлень кристалічної і утворенням структур мартенситного типу.

При додатковому легуванні цих сталей комплексом елементів Cr-Mn-Si-Ti-V (сталі 25ХГСТФЛ, 45ХГСТФЛ) збільшення фізичного розширення лінії (110) зумовлено наступними особливостями їх впливу

на тонку кристалічну будову сталей. Так, кремній цілком розчинюється у матриці не утворюючи нових фаз, що викликає розширення лінії (110) за всіх швидкостей охолодження і температур перегріву розплаву. При легуванні титаном за умов повільного охолодження розплаву при кристалізації ($V_{ox} = 5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$) приріст розширення лінії (110) пов'язаний з подрібненням структури, а при швидкому охолодженні титан фіксується у твердому розчині і привносить додаткові викривлення кристалічної ґратки сталей. З підвищенням швидкості охолодження у твердому розчині комплексно легованих сталей суттєво зростає кількість вуглецю, хрому, марганцю. Повільне охолодження зумовлює також виділення карбідів ванадію [8], а за швидкого охолодження зростання ширини лінії (110) пов'язано і з його розчиненням у матриці сталей. Що ж до температури розплаву перед кристалізацією, то найбільші значення показника ширини ліній (110) спостерігаються за температури $1570 \text{ }^\circ\text{C}$, що відповідає практичним рекомендаціям ливарного виробництва для умов нормального охолодження. Висока інтенсивність тепловідбору при кристалізації сталей зумовлює за всіх режимів перегріву розплаву суттєве розширення лінії (110).

Таким чином встановлено, що залежно від температурно-часових параметрів обробки розплаву, процесів кристалізації і структуроутворення формуються литі структури сталей, які суттєво відрізняються за дисперсністю, розміром зерна, характеристиками дендритної і тонкої кристалічної будови. Це зумовлює відповідні зміни показників механічних властивостей сталевих виливків. Так при повільному охолодженні ($V_{ox} = 5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$) і незначному перегріві розплавів ($1520 \text{ }^\circ\text{C}$) рівень механічних властивостей вуглецевих сталей досить низький (рис. 4). Поріг міцності (σ_b) сталей 25Л і 45Л становить 233МПа і 420 МПа, поріг текучості (σ_T) – 200 МПа і 250 МПа, твердість HV115 і HV200 відповідно.

Перегрів розплаву сталей до $1670 \text{ }^\circ\text{C}$ зумовлює підвищення цих характеристик в середньому на 6 – 10 %, за рахунок деякого збільшення градієнта температур при кристалізації, і зниження рівня ударної в'язкості у зв'язку із збільшенням зерна в литій структурі.

За умов же інтенсивного охолодження під час кристалізації ($V_{ox} = 350 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$) рівень механічних властивостей сталей за всіх режимів перегріву розплаву суттєво підвищується в середньому σ_b на 80 % і σ_T на 60 % (сталь 25Л), на 20 % і 26 % (сталь 45Л) відповідно. При цьому одночасно з підвищенням вказаних характеристик механічних властивостей при збільшенні інтенсивності охолодження розплаву (V_{ox}) підвищуються і характеристики пластичності і ударної в'язкості у 2 – 3 рази.

З ускладненням хімічного складу цих сталей при додатковому їх легуванні комплексом елементів Cr-Mn-Si-Ti-V рівень механічних властивостей сталей в цілому підвищується за рахунок зростання легованості твердого розчину, зміцнюючи карбідних фаз і утворення структур більшої нерівно важкості (рис. 5). Проте зберігається встановлений характер і закономірність зміни показників механічних властивостей 25ХГСТФЛ і 45ХГСТФЛ залежно від температури розплаву і швидкості його охолодження під час кристалізації і структуроутворення.

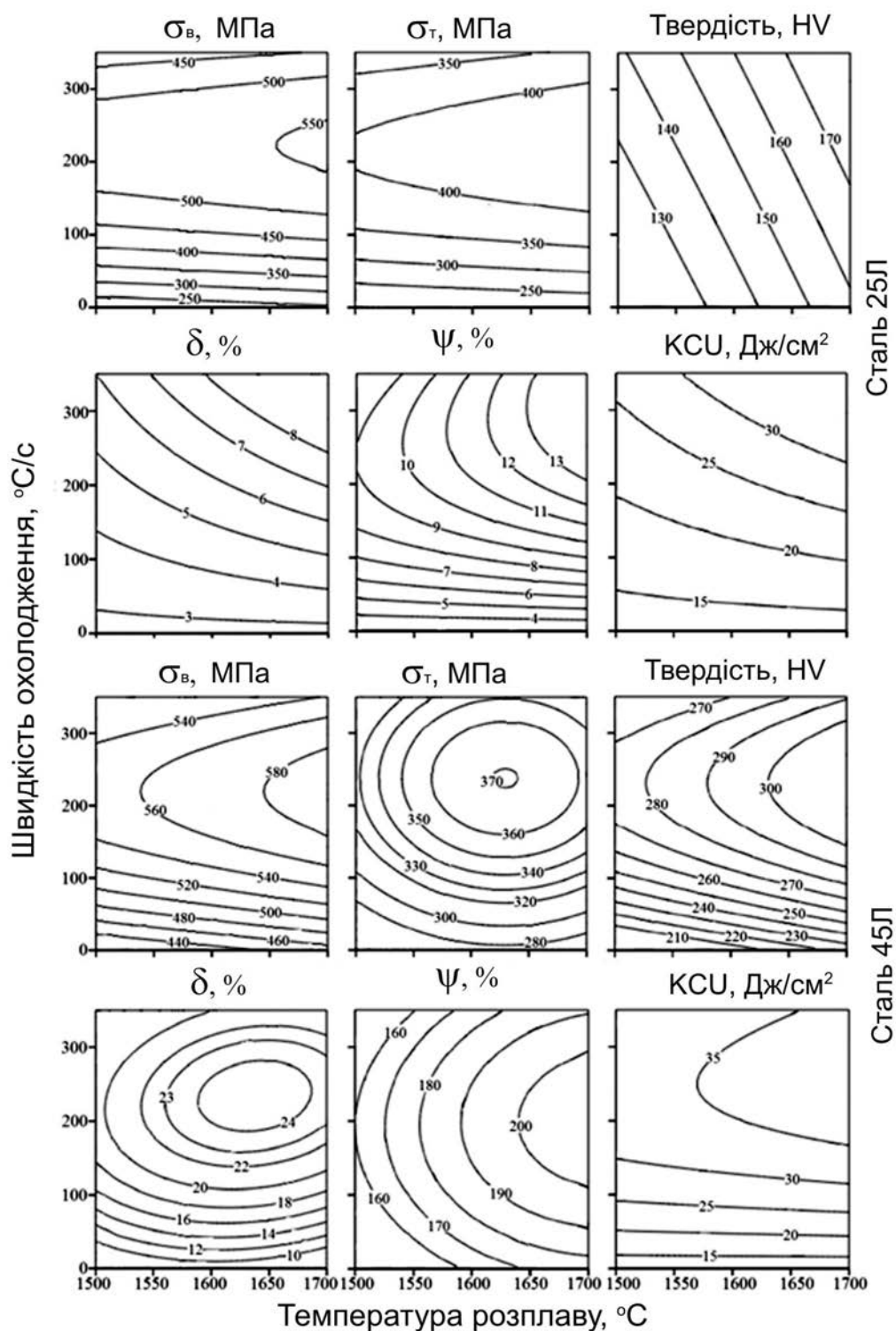


Рис. 4. Механічні властивості вуглецевих сталей залежно від температурно-часових умов кристалізації.

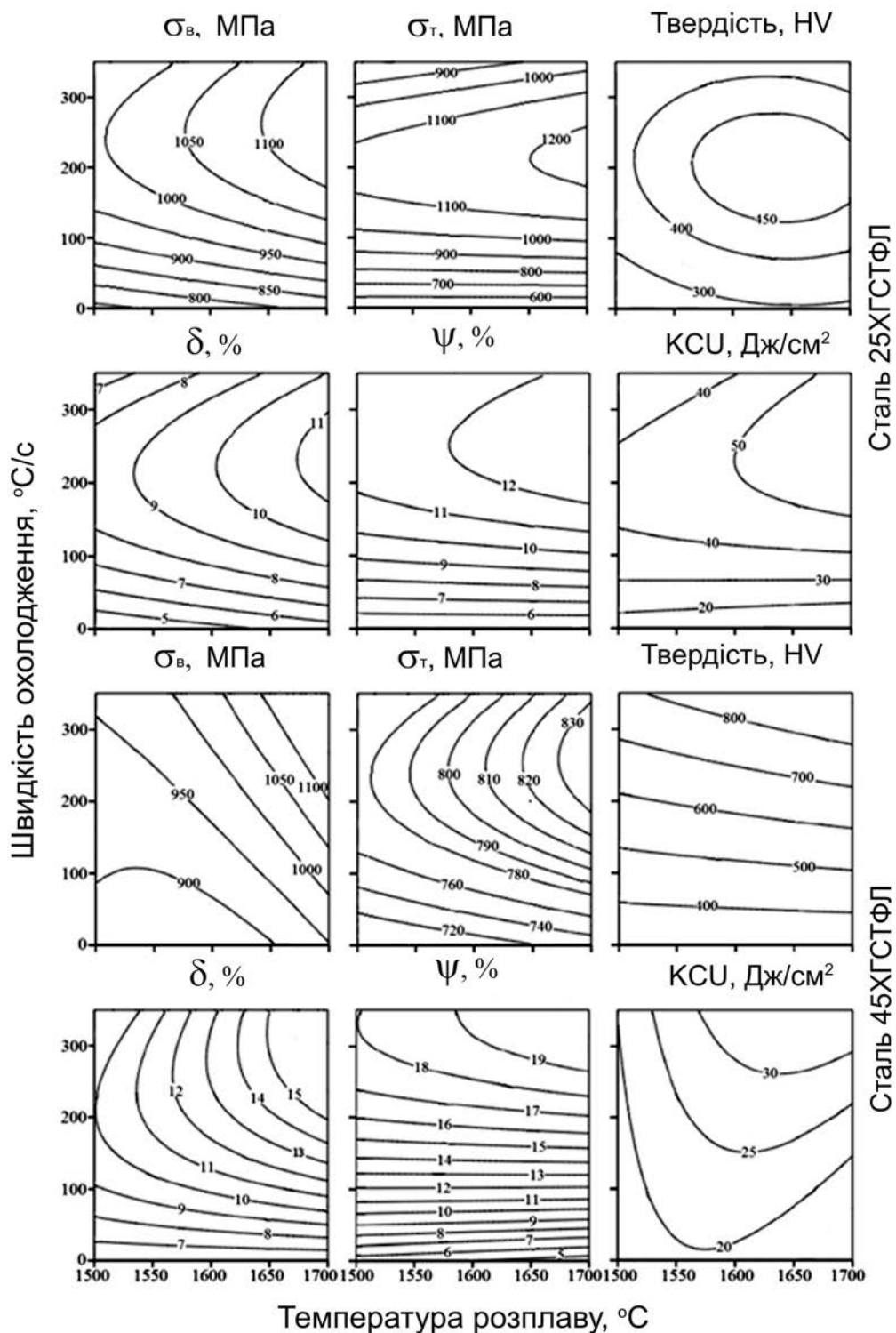


Рис. 5. Механічні властивості легованих сталей залежно від температурно-часових умов кристалізації.

Так, при повільному охолодженні розплаву ($V_{ox} = 5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{c}$) і перегріві сталей в інтервалі температур 1520 – 1670 $^\circ\text{C}$ значення порога міцності (σ_b) і порога текучості (σ_T) зростає в середньому на 10 % (сталь 25ХГСТФЛ) і на 5 % (сталь 45ХГСТФЛ) відповідно. При цьому відзначимо деяке підвищення твердості сталей при перегріві розплаву до 1670 $^\circ\text{C}$ на HV12 (сталь 25ХГСТФЛ) і на HV32 (сталь 45ХГСТФЛ) при зниженні показників їх ударної в'язкості відповідно на 23 % і 14 %.

З підвищенням швидкості охолодження розплаву сталей при кристалізації, відповідно розглянутої вище зміни їх структурних характеристик, суттєво зростають показники міцності, пластичності і ударної в'язкості за всіх досліджуваних режимів перегріву розплаву. Найбільш суттєве підвищення цих показників спостерігається при швидкості охолодження розплаву сталей $V_{ox} = 350 \text{ }^\circ\text{C}/\text{c}$.

При цьому значення порога міцності (σ_b), порога текучості (σ_T) і твердості (HV) сталей суттєво зростають відповідно на 30, 60 і 30 % (сталь 25ХГСТФЛ) і на 20, 25 і 65 % (сталь 45ХГСТФЛ) при одночасному підвищенні рівня їх ударної в'язкості у 2 – 3 рази.

Одержані, в результаті обробки експериментальних даних методом регресійного аналізу, інтерполяційні моделі та їх графічні зображення дозволяють кількісно оцінити вплив досліджуваних термодинамічних параметрів – температури розплаву (T, $^\circ\text{C}$) і швидкості його охолодження (V_{ox} , $^\circ\text{C}/\text{c}$) при кристалізації на характеристики механічних властивостей досліджуваних сталей.

Узагальнюючи результати досліджень, відзначимо, що серед технологічних факторів, які визначають формування литої структури і механічних властивостей сталей, домінуюча роль належить інтенсивності тепловідбору під час тверднення виливків. Висока швидкість охолодження розплаву при кристалізації зумовлює збільшення кількості зародків кристалізації за рахунок підвищення ступеня переохолодження розплаву, нівелює негативний вплив високої температури перегріву металу перед розливкою. Це забезпечує формування у виливках сталей більш дисперсної і однорідної структури, зменшення розміру зерна, підвищення дисперсності, щільності і розгалуженості дендритної структури, тонкої кристалічної будови сталі. При цьому досягається суттєве підвищення механічних властивостей литих сталей, поєднання високих характеристик міцності, пластичності та ударної в'язкості. Одержані математичні моделі (рівняння регресії), що визначають взаємний вплив швидкості охолодження і температури перегріву розплаву на структуру і механічні властивості досліджуваних сталей, дозволяють одержувати сталеві виливки з наперед заданими властивостями на рівні властивостей виробів із деформівних сталей аналогічного хімічного складу.

Література

1. Ефимов В.А. Разливка и кристаллизация стали. – М.: Металлургия, 1976. – 552 с.
2. Вейник А.И. Тепловые основы теории литья. – М.: Машгиз. 1948. – 163 с.

3. Куманин И.Б. Вопросы теории литейных процессов. – М.: Машиностроение, 1976. – 216 с.
4. Гуляев Б.Б. Теория литейных процессов. – Л.: Машиностроение, 1976. – 216 с.
5. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. – М.: Мир, 1973. – 424 с.
6. Хартман К., Лецки Э., Шеффер В. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. – М.: Мир, 1980. – 540 с.
7. Бялік О.М., Кондратюк С.Є., Кіндрачук М.В., Черненко В.С. Структурний аналіз металів. Металографія, фрактографія. – Київ: Політехніка, 2006. – 326 с.
8. Голиков И.Н., Гольдштейн М.И., Мурзин О.И. Ванадий в стали. – М.: Металлургия, 1968. – 292 с.

Referances

1. Efimov V.A. *Razlivka i kristallizatsiya stali* (Casting and crystallization of steel), Moskva: Metallurgiya, 1976, 552 p. [in Russian].
2. Veynik A.I. *Teplovyye osnovy teorii litya* (Thermal foundations of the theory of casting), Moskva: Mashgiz, 1948, 163 p. [in Russian].
3. Kumanin I.B. *Voprosy teorii liteynykh protsessov* (Questions of the theory of casting processes), Moskva: Mashinostroyeniye, 1976, 216 p. [in Russian].
4. Gulyayev B.B. *Teoriya liteynykh protsessov* (Theory of casting processes), Leningrad.: Mashinostroyeniye, 1976, 216 p. [in Russian].
5. Dreyper N., Smit G. *Prikladnoy regressionnyy analiz* (Applied regression analysis), Moskva: Mir, 1973, 424 p. [in Russian].
6. Khartman K., Letski E., Sheffer V. *Planirovaniye eksperimenta v issledovanii tekhnologicheskikh protsessov*, (Planning of an experiment in the study of technological processes), Moskva: Mir, 1980, 540 p. [in Russian].
7. Byalik O.M., Kondratyuk S.Ye., Kindrachuk M.V., Chernenko V.S. *Strukturniy analiz metaliv. Metalohrafiya, fraktohrafiya* (Structural analysis of metals. Metallography, fractography), Kyiv: Politekhnikna, 2006, 326 p. [in Ukrainian].
8. Golikov I.N., Goldshhteyn M.I., Murzin O.I. *Vanadiy v stali* (Vanadium in steel), Moskva: Metallurgiya, 1968, 292 p. [in Russian].

Одержано 28.05.19

С. Е. Кондратюк, В. И. Вейс, Ж. В. Пархомчук, О. О. Токарева

Структура и свойства литых сталей в связи с термокинетическими параметрами обработки и кристаллизации расплава

Резюме

Исследовано влияние температуры перегрева расплава сталей над равновесным ликвидусом (20...170 °С) и скорости охлаждения его при кристаллизации (5...650 °С/с) на характеристики литой структуры и механические свойства конструкционных сталей 25Л, 25ХГСТФЛ, 45Л, 45ХГСТФЛ. Установлено закономерное повышение дисперсности их литой структуры и механических свойств в условиях быстрого охлаждения и увеличения градиента температур во время кристаллизации. На основе результатов экспериментов получены интерполяционные модели взаимосвязи температуры перегрева расплава, скорости его охлаждения и их влияния на структуру и свойства сталей, позволяющие прогнозировать свойства стальных отливок в пределах исследованного факторного пространства.

Ключевые слова: сталь, расплав, кристаллизация, механические свойства.

S. Ye. Kondratyuk, V. I. Veis, Z. V. Parkhomchuk, O. O. Tokareva

Structure and properties of cast steels depending on thermokinetic parameters of treatment and crystallization of melt

Summary

The effect of the overheating temperature of steel melts above equilibrium liquidus (20...170 °C) and cooling rate at crystallization (5...650 °C/c) on characteristics of cast structure and mechanical properties of structural steels 25Л, 25ХГСТФЛ, 45Л, 45ХГСТФЛ was researched. The regular increase in the dispersion and mechanical properties of their cast structure under conditions of rapid cooling and an increase in the temperature gradient during crystallization was established. Based on the results of experiments, interpolation equations of the effect of melt overheating and cooling rates on the structural and mechanical properties of steels are obtained. The obtained equations allow to predict the properties of castings within the studied factor space.

Keywords: steel, melt, crystallization, mechanical properties.

Журнал **МОМ** внесено до Переліку наукових фахових видань України згідно наказу Міністерства освіти і науки України №241 від 09.03.2016.

Повна назва журналу
**“Науково-технічний журнал
“Металознавство та обробка металів”**

Для регулярного одержання журналу потрібно перерахувати вартість заказаних номерів на розрахунковий рахунок Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України. Вартість одного номера журналу – 40 грн., передплата на рік – 160 грн. Ціна архівних номерів 1995 – 2018 рр. – 10 грн.

**Розрахунковий рахунок для передплатників,
спонсорів і рекламодавців:**

банк ДКСУ в м. Києві, р/р 31257293112215, код банку 820172
Отримувач – ФТІМС НАН України, код ЄДРПОУ 05417153,
з посиланням на журнал “МОМ”.

Копію документа передплати та відомості про передплатника
просимо надсилати до редакції,
вказавши номер і дату платіжного документа.