

СТУДЕНТСЬКА НАУКОВА РОБОТА

**ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЧИННИКІВ ОХОЛОДЖЕННЯ СТАЛІ НА
СПАДКОВІСТЬ ЕЛЕМЕНТІВ СТРУКТУРИ**

ШИФР „ДОСЛІДНИК”

РЕФЕРАТ

Тема: „Дослідження структуроутворення і спадковості литих сталей”.

Обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету і задачі дослідження, наведені основні результати роботи, їх практичне значення та зв'язок з науковими темами.

Досліджено вплив температурно-часових умов кристалізації і охолодження виливків на формування первинної литої структури, ліквідацію елементів, характеристики дендритної будови, тонку кристалічну структуру, механічні властивості литих сталей.

Розглянуто вплив температурно-часових параметрів кристалізації на характеристики вторинної литої структури, фізико-механічні властивості конструкційних сталей та можливості їх спадкування при технологічних операціях термічної обробки.

Проведено порівняльне дослідження щодо проявів спадковості і закономірностей впливу термічної обробки на структуру і властивості сталей з різною вихідною литою структурою, зумовленою умовами кристалізації.

Робота складається зі вступу, трьох розділів, загального висновку, списку з 13 використаних джерел літератури та 2 додатків. Роботу викладено на 26 сторінках друкованого тексту, включаючи 6 таблиць і 7 малюнків.

ШВИДКООХОЛОДЖЕНА СТАЛЬ, КРИСТАЛІЗАЦІЯ, ЛІКВАЦІЯ,
СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ, ФАЗОВА СПАДКОВІСТЬ, ІНТЕНСИВНИЙ
ТЕПЛОВІДБІР

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ.....	2
ВСТУП.....	4
1. Уявлення про спадковість металевих матеріалів.....	6
2. Методика проведення досліджень.....	9
3. Одержані результати, їх обробка та аналіз.....	10
4. Висновки.....	24
ЛІТЕРАТУРА.....	26
Додаток А Акт впровадження в навчальний процес	
Додаток Б Акт впровадження у виробництво	

ВСТУП

Потреби науково-технічного прогресу стимулюють інтенсивний розвиток матеріалознавства, суть якого полягає в удосконаленні наявних матеріалів і пошуку й розробці нових матеріалів з новими, у ряді випадків незвичайними властивостями.

Умови ринкової економіки вимагають від машинобудівних підприємств України впровадження прогресивних технологій, що забезпечують одержання виробів необхідної якості та низької собівартості. Це досягається завдяки більш широкому використанню ливарних виробів замість аналогічних виробів з прокату. Завдяки ливарним технологіям ми маємо змогу скоротити час виготовлення виробів, зменшити кількість операцій та обсяг механічної обробки, виготовляти виливки з найбільш наближеними розмірами і формою до готової деталі, а також зменшити собівартість виробництва.

На жаль, існуючі ливарні технології іноді не забезпечують відповідної якості виливків, необхідного поєднання характеристик міцності та пластичності, а також є шанси одержати дефекти литих деталей, що виготовляють із застосуванням традиційних технологій: транскристалізація, грубозернистість структури, ліквіація, пористість та крихкість литого металу. Тому виникає необхідність вдосконалення існуючих та створення нових ливарних технологій. При цьому доцільно керуватися новітньою концепцією щодо створення „інтелектуальних” матеріалів, згідно якої матеріал розглядається не тільки як речовина із заданим хімічним складом, а як інтегральне поняття, що об’єднує в собі речовину, конструкцію виробу та технологію його виробництва і обробки. Потрібний рівень властивостей досягається не тільки за рахунок відповідного хімічного складу та структурою, а також шляхом керування процесами кристалізації і структуроутворення виливків.

Відомі результати досліджень, що свідчать про можливість активного та цілеспрямованого керування процесами кристалізації, структуроутворення і підвищення властивостей литих сталей за рахунок використання зовнішніх диференційованих схем впливу на рідкий метал під час кристалізації та охо-

лодження виливків [1,2]. Вирішення проблеми ускладнюється відсутністю системних досліджень в цьому напрямку і складністю процесів, викликаних одночасною дією значного числа факторів на тверднення і формування структурно-фазового складу виливків.

З урахуванням цього, проведення досліджень, що стосуються впливу фізико-технологічних факторів на кристалізацію, структуроутворення і властивості сталевих виливків є актуальним і необхідним для створення наукової бази нових технологій. Актуальність проведення таких досліджень ґрунтується також на необхідності підвищення якості та властивостей сталевих виливків, зниження металоємності, скорочення енерго- і трудовитрат.

Оскільки значну частину литих виробів піддають тепловій обробці, то вивчення процесів трансформації литих структур сталей при подальших операціях термічної обробки є важливим, як у науковому так і в прикладному аспектах. Вивчення останньої групи проблем пов'язано з явищем спадковості металевих матеріалів, тобто із збереженням в них певних особливостей будови, структури і властивостей вихідного металу після дії різних технологічних впливів.

1. Уявлення про спадковість металевих матеріалів

Вивчення проблем процесу трансформації литих структур при термічній обробці пов'язано з явищем спадковості металевих матеріалів. Під спадковістю металів і сплавів розуміють збереження в них певних особливостей будови, структури або властивостей вихідного матеріалу після дії різних технологічних впливів, які зумовлюють певні фазові або структурні перетворення і зміну властивостей металевих матеріалів. Спочатку спадковість розглядали як зв'язок між характеристиками шихти і властивостями розплаву та литих виробів. На сьогодні визнають існування кількох видів спадковості – хімічної, технологічної, структурної, фазової тощо[3-7].

Особливий вплив на формування кінцевої структури, фізико-механічних і експлуатаційних властивостей мають прояви спадковості у литих виробах [6, 7]. Залежно від умов тверднення розплаву і охолодження виливків може утворюватись лита структура, що суттєво відрізняється за розміром зерна, однорідністю, дисперсністю і щільністю дендритної структури, за ступенем легованості твердого розчину, ліквациєю, розміром та розподілом неметалевих вкраплень.

Із теорії відомо, що при твердненні сплавів відбувається виділення теплоти кристалізації, утворення та ріст кристалів, перерозподіл лікватів та конвективне переміщення розплаву вздовж границі тверднення [8, 9]. Суттєво впливають на ці процеси температурно-часові умови кристалізації виливків. Процес зародження і росту кристалів твердої фази з рідкого стану називають первинною кристалізацією, а структуру, що утворюється – первинною. Кристали з рідини ростуть в напрямку перпендикулярному до поверхні охолодження[2, 9]. У залежності від хімічного складу сталі, швидкості кристалізації і градієнту температур на міжфазній поверхні тверднення відбувається за комірковим, комірково-дендритним і дендритним типом кристалізації[10]. При малій ширині зони переохолодження розвивається ріст гладких виступів, що дає комірковий тип кристалізації. При більшій ширині створюються умови для бічного розгалуження виступів, що призводить до комірково-

дендритного і дендритного типів кристалізації. Слід відзначити дендритний тип кристалізації, як один з найбільш розповсюджених видів тверднення металів та сплавів. Основними причинами дендритного росту кристалів є виділення скритої теплоти кристалізації, явища ліквідації, анізотропія теплопровідності кристалів, що утворились.

Основними факторами, що впливають на швидкість росту дендритів є переохолодження, умови тепловідбору та наявність у розплаві домішок. Величина переохолодження залежить не тільки від ступеня перегріву, а і від швидкості охолодження розплаву[2]. Чим вища швидкість охолодження розплаву тим більший ступінь переохолодження на межі рідкої та твердої фаз. Оскільки розгалуженість дендритів залежить від інтенсивності тепловідбору, то подібнення первинної литої структури буде тим більшим, чим більше ступінь переохолодження сплаву. При переміщенні границі тверднення всередину вилівка інтенсивність тепловідбору зменшується. Це супроводжується зниженням переохолодження і збільшенням гілок дендритів. Слід також враховувати, що при твердненні реальних об'ємів металу зі зростанням затверділого шару швидкість кристалізації зменшується. Це відбувається внаслідок підвищення теплового опору, що перешкоджає тепловідбору від тверднучого металу. Тому кожен шар закристалізованого металу по перерізу вилівка має свою швидкість кристалізації. Відмінність в швидкостях кристалізації різних об'ємів великих зливок може бути значною (в 2,5–15 разів), що призводить до утворення різних структурних зон [11].

Як відомо, механічні та спеціальні властивості литих металів значною мірою залежать від будови дендритів та ліквідації хімічних елементів[12]. Найважливішими параметрами, за якими оцінюють дендритну структуру, є відстань між гілками дендритів першого та другого порядку, щільність та дисперсність дендритної структури. Підвищення дисперсності дендритної структури та зменшення відстані між гілками дендритів сприяє отриманню більш міцного та пластичного литого металу[2,9,12]. А зі зростанням швидкості кристалізації та температурного градієнту відстань між гілками дендритів першого порядку зменшується.

Швидкість охолодження металу, що закристалізувався (в інтервалі $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення), також суттєво впливає на структурні перетворення в ділянках по-різному легованих внаслідок хімічної неоднорідності. При охолодженні перетворення аустеніту починається в областях з мінімальним вмістом легуючих елементів і закінчується в областях з їх максимальним вмістом. На мікроскопічну хімічну неоднорідність впливає тип кристалізації. Комірковій структурі відповідають ліквацийні зони між осередками великої довжини, але малої ширини. Для дендритної структури характерне утворення ліквацийних зон малої довжини і ширини.

Перш за все, слід відзначити дослідження щодо генетичного зв'язку між твердою та рідкою фазами. Так, Баум Б.А. і Тягунов Г.В. вказують на спадковий зв'язок структури сплавів в твердому стані з особливостями структур ближнього порядку в розплаві [3]. В роботах Нікітіна В.І., Батишева А.І. та ін. розглянуто процеси передачі генетичної інформації від одного агрегатного стану металу до іншого. Спадковість металів у твердому стані розглядають у проявах відновлення зерна (Садовський В.Д., Счастлівцев В.М.), збереження границь вихідних зерен металів (Гербих Н.М., Садовський В.Д. та ін.), як розмірну пам'ять (Баранов О.О., Алімов В.І.). Ошкад'єв С.П., Гриднєв В.Н. відзначають важливу роль дислокаційної структури як генетичного фактору фазових перетворень, Д'яченко С.С. також вказує на фазову спадковість. Визначальну роль у спадковості металевих матеріалів віддають сукупності дефектної і атомнокристалічної структури [5].

Виходячи з цього, актуальним стає дослідження структурної і фазової спадковості литих сталей, процесів збереження і трансформації структури (а значить і властивостей) сталі в залежності від умов кристалізації та майбутніх операцій термічної обробки. Дослідження цих процесів і встановлення таких закономірностей дозволить прогнозувати властивості і оптимізувати технологічні режими обробки литих виробів, реалізувати додаткові резерви підвищення властивостей сталей у виливках.

2. Методика проведення досліджень

Методикою виконання роботи передбачено створення різних литих структур шляхом цілеспрямованого використання температурно-часових технологічних факторів і дослідження впливу структурної та фазової спадковості литих сталей на формування кінцевої структури, фазового складу і властивостей після різних операцій термічної обробки.

Дослідження проведено на вуглецевих і комплексно легованих сталях: 25Л, 25ХГСТЛ (табл.1).

Таблиця 1

Хімічний склад досліджуваних сталей

Марка сталі	Вміст елементів, %				
	C	Mn	Si	Cr	Ti
25Л	0,23	0,40	0,30	–	–
25ХГСТЛ	0,26	0,95	0,70	1,76	0,053

Примітка: Вміст сірки та фосфору не перевищує відповідно 0,035 та 0,025%.

Дослідження впливу інтенсивності тепловідбору здійснювали на метали тріфоподібних проб, які одержували при кристалізації металу у сухих піщано-глинистих формах, мідному водоохолоджуваному кокілі, а також на прямокутних виливках, що тверднули в мідному водоохолоджуваному кокілі. Це забезпечило середню швидкість охолодження сталей в формах відповідно 2–5°C/с, 350°C/с та 800°C/с. Вимірювання температури тверднення здійснювали безпосередньо у тверднучому металі за допомогою термопари типу ТПП (платина–платинородієва) діаметром 0,1 мм та ЕОМ. Проведено порівняльне дослідження впливу температурно-часових умов кристалізації на первинну і кінцеву структуру, розподіл легуючих елементів, розмір зерна, тонку кристалічну будову і механічні властивості сталей у литому стані та литих сталей після термічної обробки, а також прокату аналогічних сталей після термічної обробки. Дослідження проведено з використанням методів металографічного, рентгеноструктурного аналізу і стандартних методів визначення механічних характеристик з наступною математичною обробкою результатів.

3. Одержані результати, їх обробка та аналіз

Дослідженнями впливу температурно-часових параметрів кристалізації на структуроутворення і фізико-механічні властивості литих конструкційних сталей встановлено, за умов регламентованої зростаючої інтенсивності тепловідбору в інтервалі швидкостей охолодження розплаву (V_{ox}) 2...800°C/с, закономірне подрібнення первинної литої структури.

Повздовжні та поперечні розміри дендритів, відстань між осями першого та другого порядку, їх розгалуженість, дисперсність та щільність дендритної структури відображають об'єктивні закономірності процесу кристалізації і дуже чутливі не тільки до інтенсивності тепловідбору, а й хімічного складу сталі.

Визначення щільності дендритної структури (ЩДС) та дисперсності дендритної структури (ДДС) проводили з використанням методів кількісної металографії, які забезпечували задовільну відтворюваність результатів та можливість оцінки похибок вимірювання.

Методики обрахунку параметрів дендритної структури, терміни та визначення викладено в інструкції [13].

Дисперсність дендритної структури згідно [13] – це кількість осних і міжосних ділянок, що уміщаються в одиницю довжини зразка. ДДС розраховували за формулою:

$$D = \frac{n}{\sum L}, \quad (1)$$

де n – кількість осних і міжосних ділянок на січній прямій, проведеній перпендикулярно до напрямку осей дендритів;

$\sum L$ – довжина січної прямої, мм.

Щільність дендритної структури згідно [14] – це співвідношення між площами, що займають осні та міжосні ділянки первинної литої структури. ЩДС визначали за формулою:

$$P = \frac{\sum L_O}{\sum L_M}, \quad (2)$$

де $\sum L_o$ – кількість осних ділянок на січній прямій, проведеної перпендикулярно до напрямку осей дендритів;

$\sum L_M$ – кількість міжосних ділянок на січній прямій, проведеної перпендикулярно до напрямку осей дендритів.

Кількісна оцінка характеристик дендритної структури показала зростання дисперсності дендритної структури при підвищенні V_{ox} у 8-10 разів, щільності дендритної структури у 2-3 рази, залежно від хімічного складу сталей (табл. 2 та рис.1).

Таблиця 2

Характеристики дендритної структури сталей залежно від швидкості охолодження при кристалізації

Сталь	$V_{ox} = 2^\circ\text{C}/\text{c}$		$V_{ox} = 350^\circ\text{C}/\text{c}$		$V_{ox} = 800^\circ\text{C}/\text{c}$	
	ДДС	ЩДС	ДДС	ЩДС	ДДС	ЩДС
25Л	1,2	0,88	10,4	1,65	15,6	2,57
25ХГСТЛ	9,9	1,28	69,7	1,93	79,3	4,12

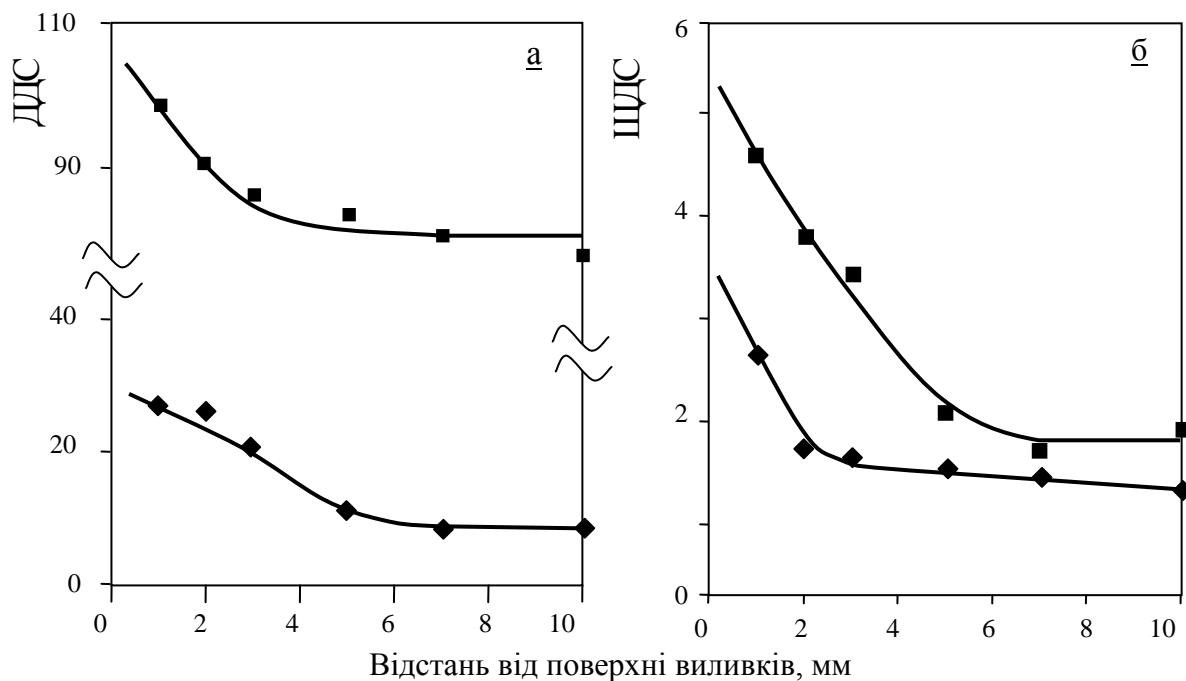


Рис. 1. Залежність параметрів дендритної структури сталі 25ХГСТЛ від швидкості охолодження.

- а – дисперсність дендритної структури;
- б – щільність дендритної структури;
- $V_{ox} = 350^\circ\text{C}/\text{c}$; —◆— $V_{ox} = 5^\circ\text{C}/\text{c}$

Це зумовлено більшим ступенем переохолодження розплаву, відповідним зростанням числа зародків кристалізації і швидкістю їх росту, що забезпечує формування дрібнокристалічної, більш щільної і однорідної первинної литої структури (рис. 2).

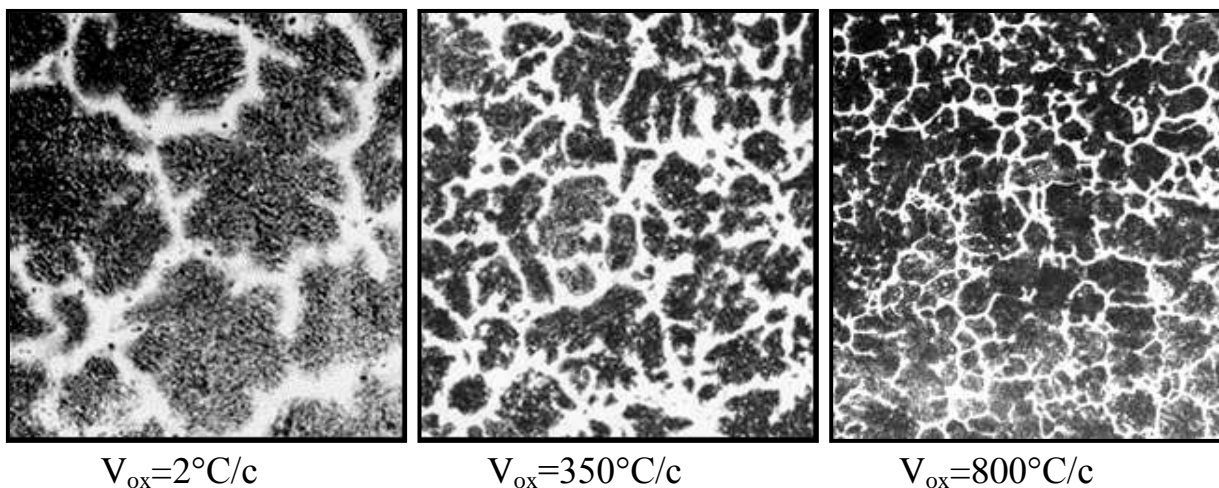


Рис. 2 Дендритна структура сталі 25ХГСТЛ ($\times 100$)

Слід відзначити, що відповідно зміні температурно-часових параметрів кристалізації відбувається не тільки зміна дисперсності, але й співвідношення основних структурних зон виливків – поверхневої коркової, стовбчастих дендритів, зони розорієнтованих дендритів. Підвищення V_{ox} від $5^{\circ}\text{C}/\text{c}$ до $350^{\circ}\text{C}/\text{c}$ супроводжується зростанням протяжності цих зон і відповідним скороченням центральної зони рівноосних кристалів.

Підвищення V_{ox} зумовлює формування більш однорідної за хімічним складом структури, що підтверджується зниженням різниці показників мікротвердості осей і міжосних ділянок дендритів швидкоохолоджених сталей (рис. 3).

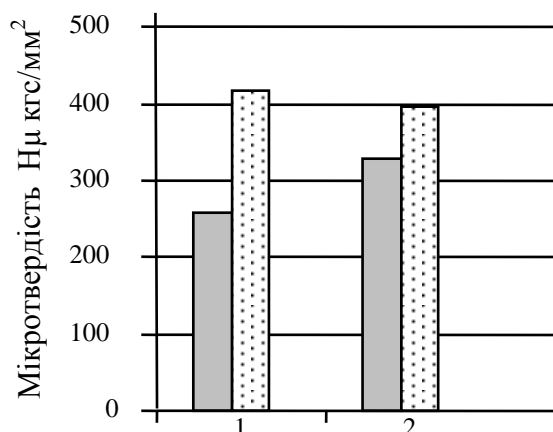


Рис. 3. Залежність мікротвердості дендритів та міждендритних ділянок від швидкості охолодження сталей.

1 – $V_{ox} = 5^\circ \text{C/s}$; 2 – $V_{ox} = 350^\circ \text{C/s}$;

1, 2 – сталь 25ХГСТЛ;

■ – осі дендритів, ■ – міждендритні ділянки

Оскільки властивості виливків залежать не лише від температурно-часових параметрів кристалізації розплаву, а і від фазово-структурного складу, що формується в інтервалі температур $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення, досліджено вплив умов охолодження сталей після тверднення на формування вторинної структури. Встановлено, що залежно від умов охолодження в інтервалі $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення формуються різні за своєю природою і завершеності твердофазні перетворення. Так охолодження з мінімальною швидкістю ($V_{ox} = 2-5^\circ \text{C/s}$) забезпечує формування ферито-перлітної структури в вуглецевих сталях (25Л), і троостомартенситної в легованих (25ХГСТЛ). При підвищенні швидкості охолодження ($V_{ox} = 350^\circ \text{C/s}$) спостерігаються голкоподібні утворення структурно вільного фериту в вуглецевих сталях (25Л) та збільшення частки мартенситу в легованих (25ХГСТЛ). Максимальна швидкість охолодження ($V_{ox} = 800^\circ \text{C/s}$) призводить до утворення структур трооститу в вуглецевих сталях (25Л) та переважно мартенситу в легованих (25ХГСТЛ).

Треба зазначити, що неоднорідність литих виробів за хімічним складом (ліквация) є одним з недоліків, що призводить до зниження механічних властивостей сталей у зв'язку з утворенням окрихчуючих фаз. З літературних даних відомо, що температурно-часові умови кристалізації сталей суттєво

впливають на проходження ліквацийних процесів у зв'язку з різною розчинністю легуючих елементів у розплаві і твердому металі. Наявність неоднорідності хімічного складу зумовлює не тільки зниження механічних властивостей литого металу внаслідок утворення сітки менш пластичної надлишкової фази, а і неоднорідність механічних властивостей литого металу в різних частинах виливка.

Кількісна оцінка розподілу легуючих елементів (Mn, Si, Cr, Ti) у структурі сталей, що кристалізувались при $V_{\text{ох}}=5^{\circ}\text{C}/\text{с}$ та $350^{\circ}\text{C}/\text{с}$ проведена з використанням скануючого електронного мікроскопу, та програми IPWin 4.5. Це дозволило отримати карти розподілу легуючих елементів залежно від умов кристалізації сталі. Встановлено значне підвищення рівномірності розподілу досліджуваних хімічних елементів в структурі швидкоохолоджених сталей, а також ступеня легованості твердого розчину. Це відповідає підвищенню площі з усередненим вмістом елементу у структурі таких сталей на 10-18 % порівняно зі звичайними умовами кристалізації.

На основі отриманих даних можна зробити висновок, що у швидкоохолодженої сталі ділянки структури з середнім вмістом легуючих елементів займають більшу площу, ніж у повільно охолодженої. У сталей, що кристалізувались при $V_{\text{ох}} = 350^{\circ}\text{C}/\text{с}$, ця величина більша ніж у сталей, що кристалізувались при $V_{\text{ох}} = 2^{\circ}\text{C}/\text{с}$.

Здатність литих сталей опиратись крихкому руйнуванню пов'язана не лише з хімічною та структурною неоднорідністю, а й з розміром зерна аустеніту. У зв'язку з цим проведено оцінку розміру зерна литих сталей, що кристалізувались за різних температурно-часових умов. Показано, що зростання швидкості охолодження призводить до подрібнення зерна (табл. 3).

Таблиця 3

Первинне аустенітне зерно залежно від швидкості тепловідбору (V_{ox}) при кристалізації сталей (номер за ГОСТ 5639-82).

Сталь	$V_{ox} = 2^{\circ}\text{C}/\text{c}$	$V_{ox} = 350^{\circ}\text{C}/\text{c}$	$V_{ox} = 800^{\circ}\text{C}/\text{c}$
25Л	-2	1	3
25ХГСТЛ	3	6	8

При повільному охолодженні ($V_{ox}=2^{\circ}\text{C}/\text{c}$) рівень механічних властивостей сталі 25Л досить низький. За умов інтенсивного охолодження ($V_{ox} = 350^{\circ}\text{C}/\text{c}$) поріг міцності значно збільшується. Це відбувається за рахунок підвищення дисперсності та щільності дендритної структури, ступеня легуваності твердого розчину і густоти дислокацій при зростанні швидкості охолодження. Одночасно з міцністю сталі при збільшенні інтенсивності тепловідбору підвищується і її пластичність. За умов підвищення швидкості охолодження ударна в'язкість зростає. Це відбувається за рахунок подрібнення зерна в сталі при збільшенні інтенсивності тепловідбору.

З ускладненням хімічного складу сталі рівень твердості зростає. Це свідчить про те, що обидва фактори (швидкість охолодження і ступінь легування) підвищують загартованість і прогартованість сталей. Відповідно змінам цих факторів змінюються і інші механічні властивості легуваних сталей. Слід відзначити, що таке зміцнення не знизило рівня пластичності та ударної в'язкості, що пов'язано з формуванням дисперсної структури і дрібного зерна. Темп приросту ударної в'язкості залежить від ступеня легування сталі, тобто від структур, що утворюються. Так, при утворенні троостомартенситу рівень ударної в'язкості нижчий. Це помітно при легуванні сталі. Зокрема, темп приросту ударної в'язкості більший у сталі 25Л, а менший – у сталі 25ХГСТЛ (табл. 4).

Таблиця 4

Механічні властивості литих сталей в залежності від швидкості тепловідбору під час кристалізації та охолодження виливків

Сталь	σ_B , МПа			σ_T , МПа			Твердість, НV		
	V_{ox} , °C/c			V_{ox} , °C/c			V_{ox} , °C/c		
	2	350	800	2	350	800	2	350	800
25Л	233	423	452	200	320	335	123	152	192
25ХГСТЛ	800	1286	1310	548	1000	1030	275	362	386
Сталь	δ , МПа			ψ , МПа			КСU, МДж/м ²		
	V_{ox} , °C/c			V_{ox} , °C/c			V_{ox} , °C/c		
	2	350	800	2	350	800	2	350	800
25Л	2,8	6,5	10	3,2	9,2	12,0	0,14	0,32	0,42
25ХГСТЛ	4,1	7,3	8,4	5,0	11,2	24	0,16	0,37	0,43

Застосування інтенсивного тепловідбору під час кристалізації і наступного охолодження твердого металу і можливість одержання підвищених механічних властивостей литої сталі дозволяють у ряді випадків відмовитись від традиційного технологічного процесу – лиття у земельну форму з наступним нагріванням під гартування. Так, досліджувані сталі вже при підвищенні швидкості охолодження до 350°C/c набувають комплекс високих механічних властивостей порівняно з виливками, відлитими в земельні форми і підданими зміцнюючій термічній обробці. Максимальний приріст властивостей спостерігається у сталі 25Л. При зростанні ступеня легування приріст властивостей, зумовлений швидкістю тепловідбору, зменшується. Найбільше прискорений тепловідбір впливає на ударну в'язкість, менше — на приріст характеристик міцності (табл. 5).

Таблиця 5

Приріст механічних властивостей (%) литих сталей, охолоджених при кристалізації зі швидкістю 350°C/с порівняно з литими в земельну форму і підданими гартуванню

Сталь	$\Delta\sigma_{\text{в}}$	$\Delta\sigma_{\text{т}}$	$\Delta\delta$	$\Delta\psi$	$\Delta \text{КСУ}$
25Л	16	16	33	34	73
25ХГСТЛ	10	8	10	12	21

Різні умови кристалізації і структуроутворення литих сталей закладають основи і відмінності трансформації і спадковості структури, фазового складу і властивостей литих сталей при наступних операціях їх термічної обробки. У зв'язку з тим, що існують спадково дрібнозернисті і спадково крупнозернисті сталі, що зумовлює дійсний розмір зерна при аустенітизації сталей, можна змінювати розмірні характеристики структури і властивості термічно зміцнених сталей.

Виходячи з цього, досліджено вплив умов кристалізації і структуроутворення на спадковість зеренної структури литої сталі при термічній обробці. Вимірювання зерна сталі 25ХГСТЛ у литому стані і після термічної обробки показало, що здатність досліджуваної сталі до росту зерна зумовлена не лише хімічним складом. Визначальну роль у цьому відіграє розмір вихідного зерна, яке визначається температурно-часовими умовами кристалізації сталі. Дрібнозернисті структури швидкоохолоджених сталей успадковують здатність зберігати невеликі розміри аустенітних зерен при нагріванні і витримуванні при високих температурах аустенітизації (рис. 4). Сталі, які кристалізувались за умов повільного охолодження мають більший темп росту зерна за умови високотемпературної ізотермічної витримки. Так, аустенітизації сталі 25ХГСТЛ при 900°C протягом чотирьох годин відповідає швидкість росту 21,1 мкм/год (для $V_{\text{ох}}=2^\circ\text{C}/\text{с}$); 8,4 мкм/год (для $V_{\text{ох}}=350^\circ\text{C}/\text{с}$) і 6,4 мкм/год (для $V_{\text{ох}}=800^\circ\text{C}/\text{с}$). Це підтверджується також результатами металографічних досліджень міграції і стану границь зерен сталей з різною вихідною структурою.

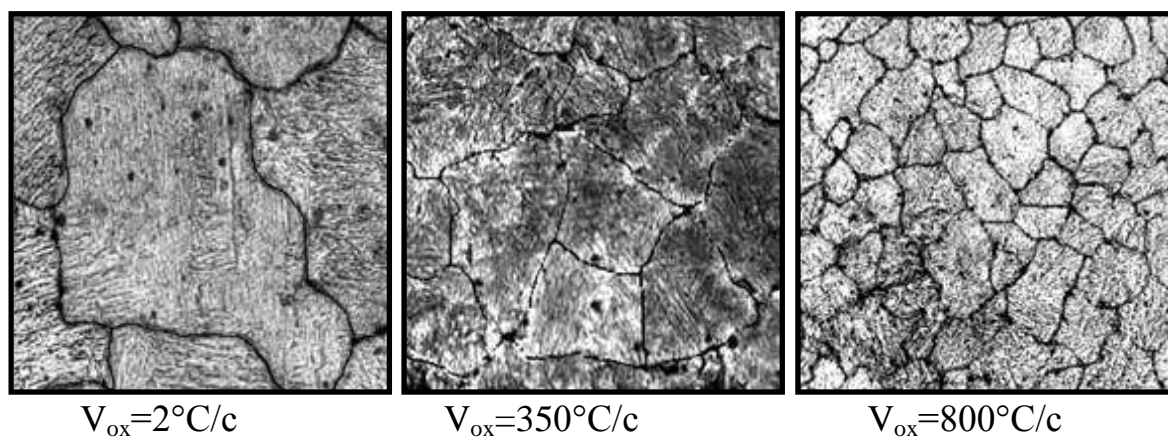


Рис. 4. Зерно в сталі 25ХГСТЛ, аустенітизація $T=900^{\circ}\text{C}$, $\tau = 4$ год. ($\times 100$)

Рентгеноструктурні дослідження сталей показали, що застосування інтенсивного тепловідбору спричиняє закономірне збільшення фізичного уширення лінії (110). Це вказує на підвищений ступінь викривлень кристалічної ґратки матриці цих сталей, як в литому стані, і, що важливо, після термічної обробки, тобто після протікання $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$ перетворення. Інакше кажучи, спрацьовує ефект спадковості. Таке явище наслідування дефектів кристалічної будови (субструктури) після поліморфного перетворення вихідної фази називають фазовою спадковістю, а також спадковістю зміцнення. Приріст фізичного уширення для швидкоохолоджених сталей найменший. Це вказує на те, що максимально можливе значення фізичного уширення досягається після гартування у швидкоохолоджених сталях. Причому для нелегованої сталі цей показник менший ніж для легованої. Це пов'язано з тим, що леговані сталі мають значну кількість домішкових атомів. Крім того, у таких сталях частково відбувається мартенситне перетворення під час охолодження у ливарній формі і тому така нерівноважна структура сталі вже має багато дефектів кристалічної будови. Густина дислокацій швидкоохолоджених сталей в 1,5-3 рази вища за таку, що спостерігається для повільно охолоджених виливків. Також більші напруження 2-го роду на 30-50% як у литому стані, так і після термічної обробки, а також зменшується розмір блоків мозаїки в 3-5 раз (рис.5).

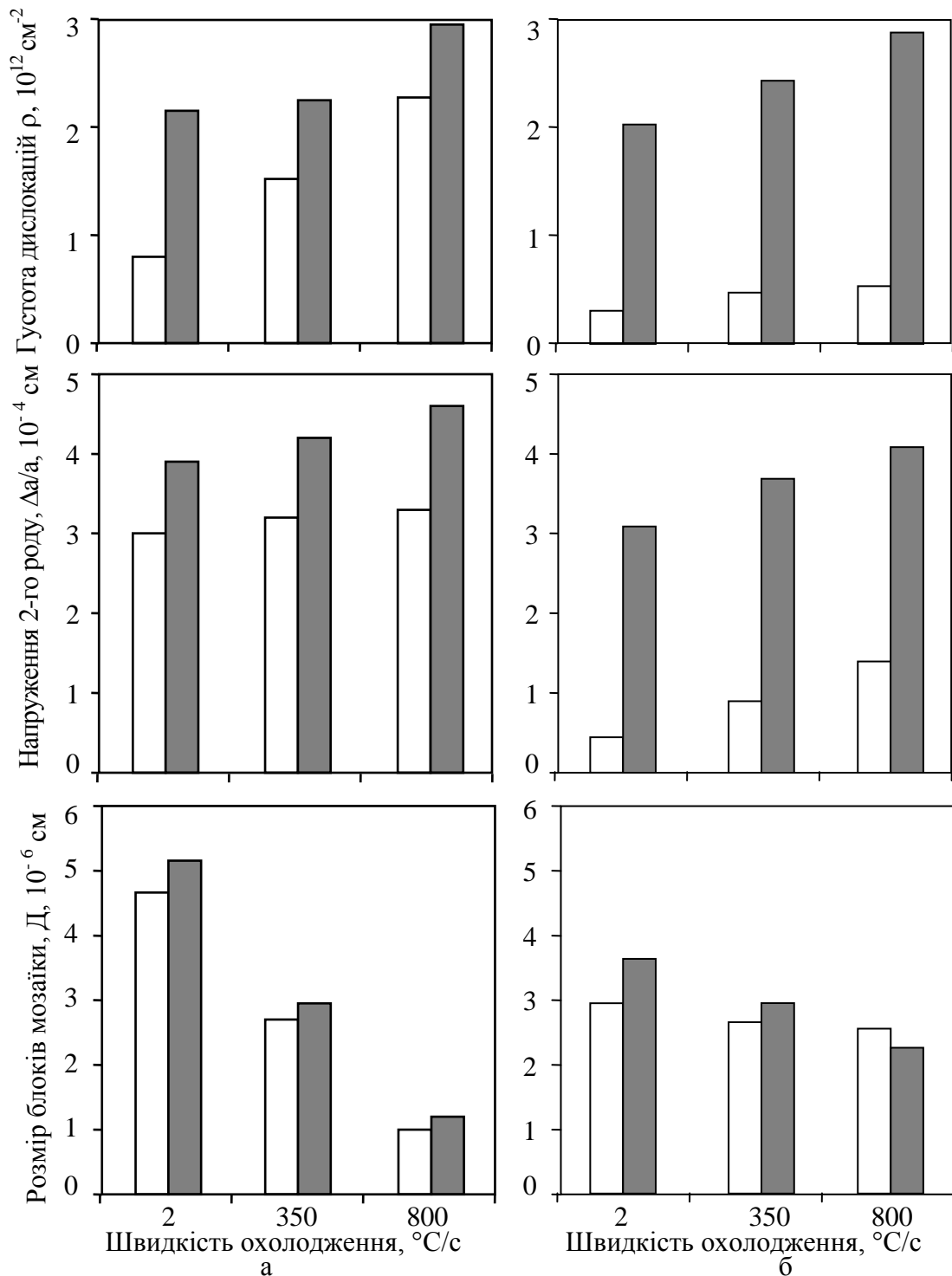


Рис. 5. Характеристики тонкої кристалічної структури сталей 25ХГСТЛ (а) та 25Л (б) залежно від швидкості охолодження при кристалізації.
 □ – литий стан, ■ – після термічної обробки.

Металографічним аналізом структури після термічної обробки встановлено, що всі сталі зберігають ознаки вихідної литої структури – орієнтованість та дисперсність структурних складових. Швидкоохолоджені сталі після

термічної обробки характеризуються більш дисперсною і гомогенною структурою. Так, структура термічно зміцненої сталі 25ХГСТЛ представлена легованим маловуглецевим мартенситом з незначною кількістю залишкового аустеніту. Кількість залишкового аустеніту у швидкоохолодженій сталі менша, ніж у сталі, що кристалізувалась за звичайних умов. Це пов'язано з більшим ступенем підготовленості структури швидкоохолодженій сталі до мартенситного перетворення, а також більшою легованістю твердого розчину. Орієнтованість структури після термічної обробки пояснюється принципом мінімуму енергії Кюри – Гіббса. У відповідності з яким, для утворення зародку нової фази орієнтованого по відношенню до вихідної матриці потрібно менше енергії, ніж для неорієнтованого. За умов низького відпуску твердість швидкоохолодженій сталі 25ХГСТЛ максимальна. Зниження швидкості охолодження при кристалізації викликає відповідне зниження твердості сталі.

Дослідженнями показано, що при наступних операціях зміцнюючої термічної обробки зберігається позитивний вплив зростаючої в межах експерименту інтенсивності охолодження на механічні властивості досліджуваних сталей (рис. 6).

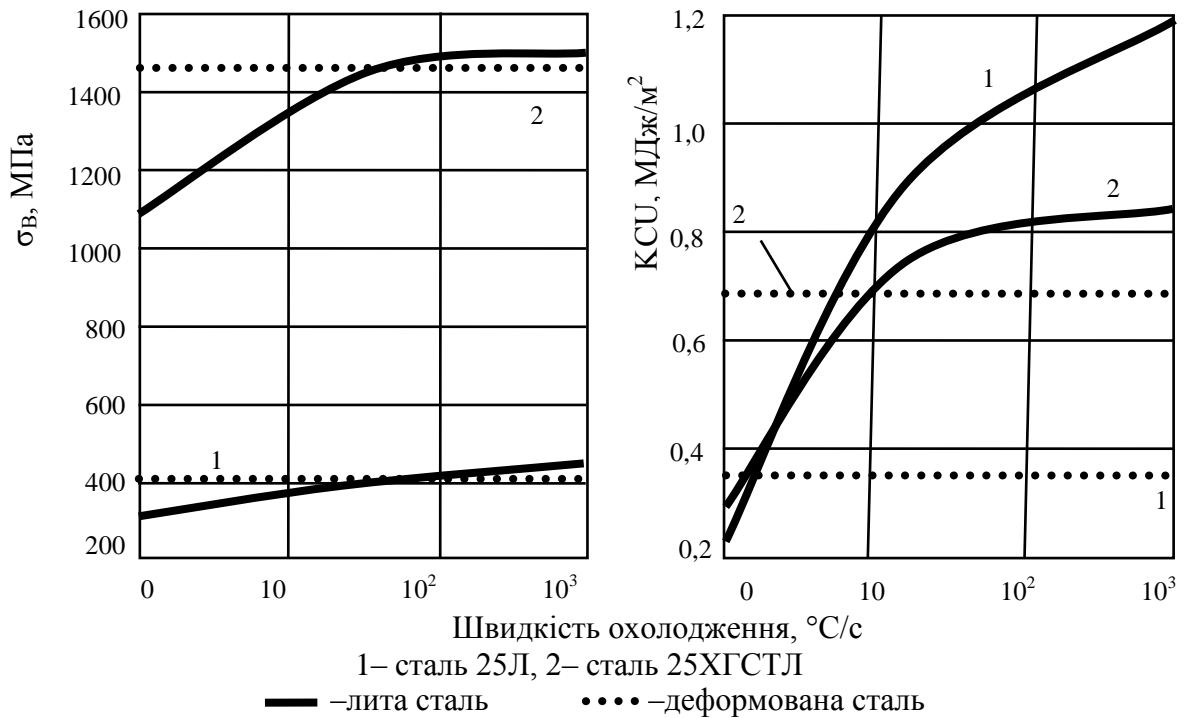


Рис. 6 Механічні властивості сталей після термообробки

Так, значення порогу міцності при розтягуванні σ_B швидкоохолоджених ($V_{ox}=350-800^\circ\text{C}/\text{c}$) термічно оброблених сталей перевищують характеристики аналогічних сталей, залитих у земельні форми ($V_{ox}=2^\circ\text{C}/\text{c}$). Відповідно збільшенню швидкості охолодження при кристалізації зростають також характеристики твердості і ударної в'язкості термічно зміцнених сталей. Співставлення характеристик міцності з результатами досліджень тонкої кристалічної будови сталей після термічної обробки показало, що високим значенням характеристик міцності відповідають малі розміри блоків мозаїки та достатньо високі значення мікротвердості та дефектів кристалічної решітки. Тобто зростання швидкості охолодження при кристалізації веде до значної субмікронеоднорідності структури, що призводить до підвищення міцності сталі. Підвищення характеристик пластичності сталей зі зростанням V_{ox} слід пов'язувати з подрібненням зерна при кристалізації швидкоохолоджених сталей. Більш дрібне вихідне зерно зберігається і після термообробки.

Швидкоохолоджені сталі і після термічної обробки характеризуються дисперсною і гомогенною структурою з більшим ступенем реалізації мартен-

ситного перетворення і мінімальною кількістю залишкового аустеніту. Порівняння структур литих і деформівних сталей після однакової термічної обробки показало, що структура швидкоохолоджених сталей практично не відрізняється від структури деформівних (рис. 7).

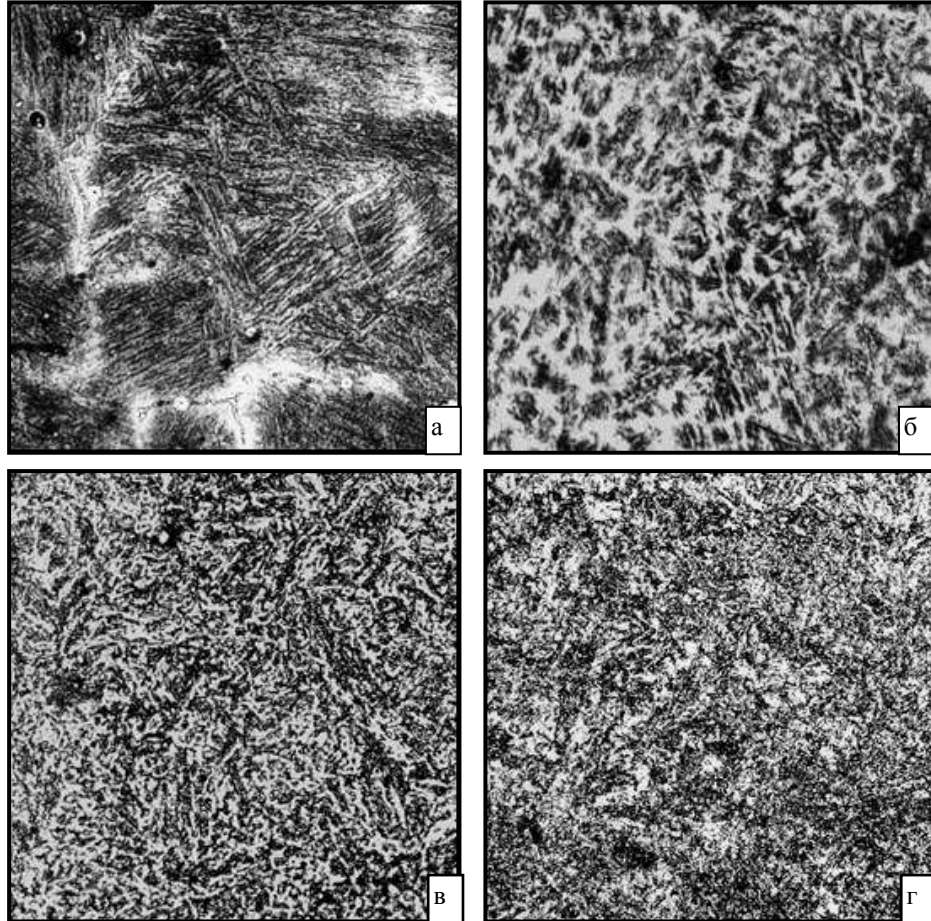


Рис. 7 Мікроструктури литої (а,б,в) та деформованої (г) сталі 25ХГСТ після гартування від 870°С та відпуску при 200°С ($\times 400$)
 а – $V_{\text{ох}}=2^{\circ}\text{C}/\text{c}$, б – $V_{\text{ох}}=350^{\circ}\text{C}/\text{c}$, в – $V_{\text{ох}}=800^{\circ}\text{C}/\text{c}$

Доцільно провести порівняння властивостей литих термічно зміцнених сталей з різною вихідною і кінцевою структурою з властивостями прокату цих сталей після аналогічної термічної обробки (табл.6).

Таблиця 6

Механічні властивості сталей після гартування та відпуску

Метод отримання заготовки	Сталь	σ_B , МПа			σ_T , МПа			Твердість, НРС		
		V_{ox} , °C/c			V_{ox} , °C/c			V_{ox} , °C/c		
		2	350	800	2	350	800	2	350	800
ливарний	25Л	355	420	438	269	292	310	24	30	32
	25ХГСТЛ	1157	1486	1552	920	1300	1340	30	40	41
кування	25	420			290			30		
	25ХГСТ	1490			1300			40		
Метод отримання заготовки	Сталь	δ , %			ψ , %			КСУ, МДж/м ²		
		V_{ox} , °C/c			V_{ox} , °C/c			V_{ox} , °C/c		
		2	350	800	2	350	800	2	350	800
ливарний	25Л	4,3	6,0	10,0	6,0	48	50	0,26	0,9	1,2
	25ХГСТЛ	6,6	10	10,2	9,9	42	44	0,30	0,72	0,84
кування	25	17			38			0,34		
	25ХГСТ	8			42			0,68		

Примітка: Сталі 25, 25ХГСТ– гартування 870°C, відпуск при 200°C;

Одержані результати свідчать про те, що за звичайних умов кристалізації сталей у піщано-глинистих формах ($V_{ox}=2^\circ\text{C}/\text{c}$) їх механічні властивості після гартування і низького відпуску не перевищують рівня механічних властивостей термічно зміцненого прокату аналогічних сталей. Зростання ж інтенсивності тепловідбору у ливарній формі під час кристалізації до $V_{ox}=350^\circ\text{C}/\text{c}$ забезпечує підвищення рівня механічних властивостей литих термічно зміцнених сталей до рівня властивостей термічно зміцненого прокату. А в разі підвищення інтенсивності тепловідбору при кристалізації сталей до $800^\circ\text{C}/\text{c}$ механічні властивості литих сталей перевищують показники міцності (σ_B , σ_T , твердість) зміцненого деформованого металу на 3–12% залежно від хімічного складу сталей.

4. Висновки

Переваги ливарних технологій ґрунтуються на можливості швидкого отримання виливків різних розмірів та ваги, наближених до форми готових виробів, низької собівартості їх виготовлення, зменшення витрат металу при механічній обробці.

Показано, що підвищення інтенсивності тепловідбору в інтервалі швидкостей охолодження (V_{ox}) 2...800°C/с і створення значного градієнта температур у двофазній зоні дозволяє ефективно впливати на фазово-структурний стан і властивості литих сталей, реалізуючи можливості формування дисперсної і щільної дендритної структури, дрібного грануляційного і аустенітного зерна, пригнічення проявів ліквациї і шкідливого впливу неметалевих вкраплень, підвищення легованості твердого розчину і ступеня завершеності мартенситного перетворення при охолодженні виливків.

Умови тверднення мають вирішальне значення для формування макрота мікроструктури і рівня властивостей литих виробів, визначають їх якість. Змінюючи умови кристалізації можна цілеспрямовано впливати на характеристики первинної литої структури сталей, а також на структуру і властивості виливків після зміцнюючої термічної обробки. Ефект спадкування зберігається також в разі тривалого аустенітизуючого нагріву, наступного гартування та відпуску.

Проведеними дослідженнями показано, що відповідні зміни залежно від умов кристалізації відбуваються на рівні тонкої кристалічної будови; підвищення швидкості охолодження призводить до зростання густоти дислокацій, викривлень кристалічної ґратки, що зумовлює більш тривале закріплення закладених при кристалізації спадкових ознак. Підвищення швидкості охолодження до 350–800°C/с забезпечує підвищення характеристик фізико-механічних властивостей литих виробів до рівня властивостей деформованого металу. Це відкриває додаткові можливості керування структуроутворенням виробів з литих сталей і значного підвищення їх механічних і експлуатаційних характеристик.

Встановлено, що сталі які кристалізувались за умов повільного охолодження ($V_{\text{ох}}=2^{\circ}\text{C}/\text{с}$) мають більший темп росту аустенітного зерна (до 21,1мкм/год) порівняно зі швидкоохолодженими (до 6,4мкм/год при $V_{\text{ох}}=800^{\circ}\text{C}/\text{с}$). Це додає технологічні можливості одержання спадково дрібнозернистих сталей.

Результати проведених досліджень можуть слугувати основою для розробки нових процесів обробки литих виробів, покращення їх фізико-механічних і експлуатаційних властивостей, дозволяють ефективно керувати структурою і властивостями литих сталей на всіх технологічних етапах їх обробки. Дослідження цих процесів і встановлення таких закономірностей дозволить прогнозувати властивості і оптимізувати технологічні режими обробки литих виробів, визначити додаткові резерви підвищення властивостей сталі у виливках.

Результати роботи впроваджено в навчальний процес в Сумському державному університеті.(Додаток А).

За результатами студентської наукової роботи на ВАТ СМНВО ім..Фрунзе (м. Суми,Україна) впроваджено технологічний процес швидкого охолодження сталі (Додаток Б).

ЛІТЕРАТУРА

1. Бочвар А.А. Металловедение / А.А. Бочвар. – М. : Metallurgizdat, 1956. – 494 с.
2. Специальные способы литья: Справочник. / под общ ред. В.А. Ефимова. – М. : Машиностроение, 1991. – 436 с.
3. Баум Б.А. Жидкая сталь / Б.А. Баум, Г.А. Хасин, Г.В. Тягунов. – М.: Metallurgiya, 1984. – 208 с.
4. Бернштейн М.Л. Структурная и субструктурная наследственность при термомеханической обработке стали / М.Л. Бернштейн, Л.М. Капуткина // Металловедение стали и титановых сплавов. – Пермь : Пермск. политехн. Ин-тут, 1980. – С. 9-16.
5. Баранов А.А. Наследственность, структура и свойства проката и поковок при термомеханическом воздействии / А.А. Баранов, В.И. Алимов // Мат. Докладов конф. «К 90-летию Стародубова К.Ф.», - Днепропетровск, 1994. – С.12-14.
6. Кондратюк С.Є. Первинна структура і спадковість властивостей литих конструкційних сталей / С. Є. Кондратюк, О.М. Стоянова, О.С. Ніконов // Вісник Дніпропетровського ун-ту, 2002. - № 8, - С. 79 – 82.
7. Тематическая подборка статей “Наследственность в литых сплавах” // Литейное производство, 2000. - № 10. – С. 2 – 22.
8. Данилов В.И. Строение и кристаллизация жидкостей / В.И. Данилов. – Киев : Наукова думка, 1956.-566 с.
9. Ефимов В.А. Технологии современной металлургии / В.А. Ефимов, А.С. Эльдарханов.- М. : Новые технологии, 2004. – 784 с.
10. Хворинов Н.И. Кристаллизация и неоднородность стали / Н.И. Хворинов ; пер. с чешского. - М. : Машгиз, 1958.–392 с.
11. Духин А.И. К вопросу о кристаллизации слитка / А.И. Духин, В.Е. Неймарк // Сб. “Затвердевание металлов”, Труды второго совещания по теории литейных процессов. - Машгиз, 1958.- С. 22-31.
12. Флемингс М. Процессы затвердевания / М. Флемингс. – М. : Изд-во «МИР», 1977. – 423 с.
13. Инструкция по определению количественных показателей (критериев) дендритной структуры. – Донецк, 1969 г.