

УДК 669.18-412:621.746

## *Спадковість і трансформація структури литих сталей при гарячій деформації і термічній обробці*

С.Є. Кондратюк, доктор технічних наук, професор

О.М. Стоянова, кандидат фізико-математичних наук

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

*Досліджено вплив вихідної литої структури конструкційних сталей, одержаних за умов нормального і швидкісного тепловідбору при кристалізації, на їх структуру і властивості після деформаційної і термічної обробки. Показано, що швидкоохолоджені сталі зберігають спадкові ознаки литої структури і забезпечують більш високі механічні властивості деформованого металу.*

Кінцева структура і властивості машинобудівних виробів з вуглецевих і легованих сталей зумовлені не лише їх хімічним складом і параметрами обробки, але й особливостями процесів кристалізації і структуроутворення литих заготовок, які піддають наступним операціям деформації і термічної обробки. Виходячи з цього особливий інтерес становлять аспекти проявів спадковості, зумовлені формуванням вихідної литої структури, наступною гарячою деформацією у сукупності з термічним впливом, як одним із найбільш поширених технологічних процесів формозмінення, формування структури і властивостей заготовок і виробів машинобудування.

У зв'язку з цим досліджено сталі 25ХГСТФЛ, 45ХГСТФЛ та 45Л з різною вихідною структурою литих заготовок, зумовленою різними температурно-часовими умовами охолодження розплаву при кристалізації при нормальному ( $V_{ox} = 2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{c}$ ) і швидкісному ( $V_{ox} = 350 \text{ }^\circ\text{C}/\text{c}$ ) тепловідборі.

З рис. 1 видно, що швидкоохолоджені при кристалізації сталі характеризуються більш високими значеннями дисперсності структури порівняно із структурами, утвореними за умов нормального тепловідбору. Так, дисперсність дендритної структури на половині радіуса виливків при підвищенні інтенсивності тепловідбору від  $2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{c}$  до  $350 \text{ }^\circ\text{C}/\text{c}$  змінюється в середньому для сталі 45Л – від  $7 \text{ мм}^{-1}$  до  $24 \text{ мм}^{-1}$  відповідно, для сталі 45ХГСТФЛ – від  $40 \text{ мм}^{-1}$  до  $140 \text{ мм}^{-1}$ , для сталі 25ХГСТФЛ – від  $7 \text{ мм}^{-1}$  до  $65 \text{ мм}^{-1}$  відповідно.

Вихідні литі заготовки діаметром 40 мм і висотою 150 мм прокатували від температури  $860 \text{ }^\circ\text{C}$  з різним ступенем обтискування ( $\varepsilon$ ) при деформації – 0,68; 0,82 та 0,92. Зразки для досліджень після деформівної обробки за вказаними режимами відпалювали при температурі  $900 \text{ }^\circ\text{C}$  протягом години з наступним охолодженням з піччю.

Металографічно встановлено (рис. 2, 3) що з підвищенням ступеня обтискування закономірно підвищується дисперсність структурних складових сталей,

## Структура і фізико-механічні властивості

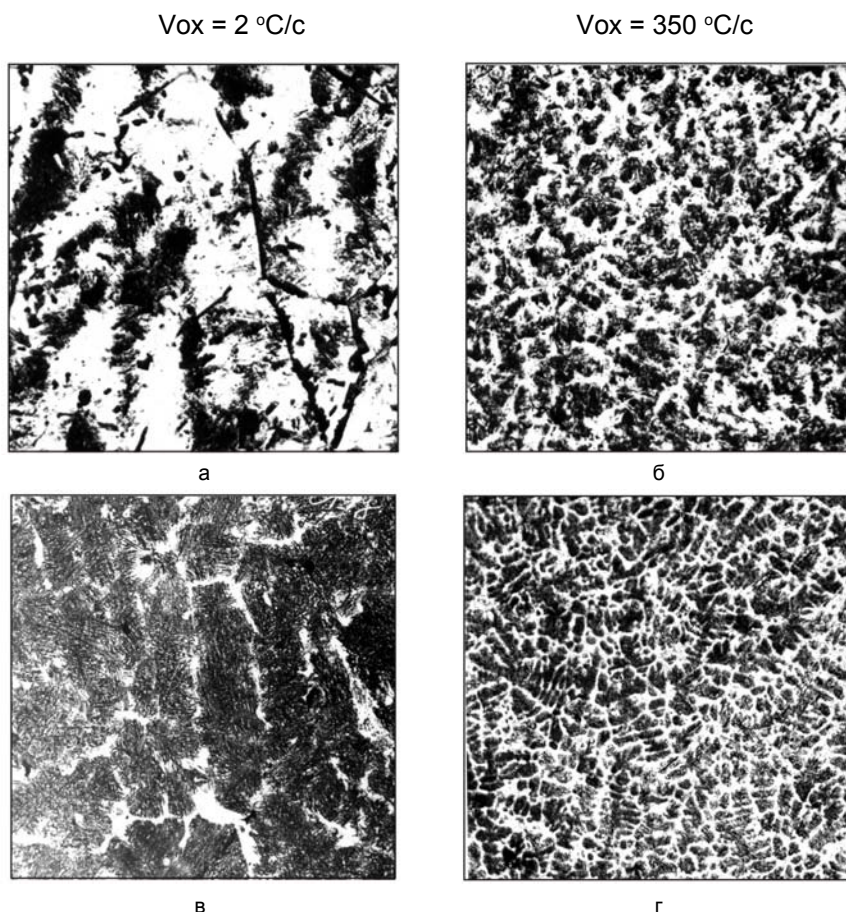


Рис. 1. Структури сталей по перерізу виливка залежно від швидкості охолодження ( $V_{ox}$ ) при кристалізації. а, б - сталь 45Л, в, г - сталь 45ХГСТФЛ.  $\times 100$ .

найбільш суттєво в прокаті швидкоохолоджених при кристалізації заготовок. В останніх також спостерігається значно вища однорідність структури при всіх ступенях обтискування. Лінійні розміри структурних складових сталей після деформації, що відповідають осним і міжосним об'ємам у структурі литих заготовок (відповідно світлі

Таблиця 1

Лінійний розмір структурних складових в сталях після гарячої деформації, мкм

Ступінь деформації, $\epsilon$	Сталь 25ХГСТФЛ		Сталь 45Л		Сталь 45ХГСТФЛ	
	$V_{ox}=2 \text{ }^{\circ}\text{C/c}$	$V_{ox}=350 \text{ }^{\circ}\text{C/c}$	$V_{ox}=2 \text{ }^{\circ}\text{C/c}$	$V_{ox}=350 \text{ }^{\circ}\text{C/c}$	$V_{ox}=2 \text{ }^{\circ}\text{C/c}$	$V_{ox}=350 \text{ }^{\circ}\text{C/c}$
0,68	<u>25,0</u>	<u>20,0</u>	<u>21,3</u>	<u>14,5</u>	<u>20,9</u>	<u>12,3</u>
	24,6	20,0	22,7	14,8	21,5	12,3
0,82	<u>18,9</u>	<u>13,4</u>	<u>17,5</u>	<u>11,9</u>	<u>17,1</u>	<u>10,1</u>
	17,9	13,4	18,4	12,0	17,5	10,0
0,92	<u>14,3</u>	<u>12,0</u>	<u>13,1</u>	<u>9,9</u>	<u>12,8</u>	<u>7,6</u>
	14,4	11,7	13,4	9,8	12,7	7,3

Примітка: над рискою – світла складова структури (ділянки осей дендритів),  
під рискою – темна складова (міжосні ділянки)

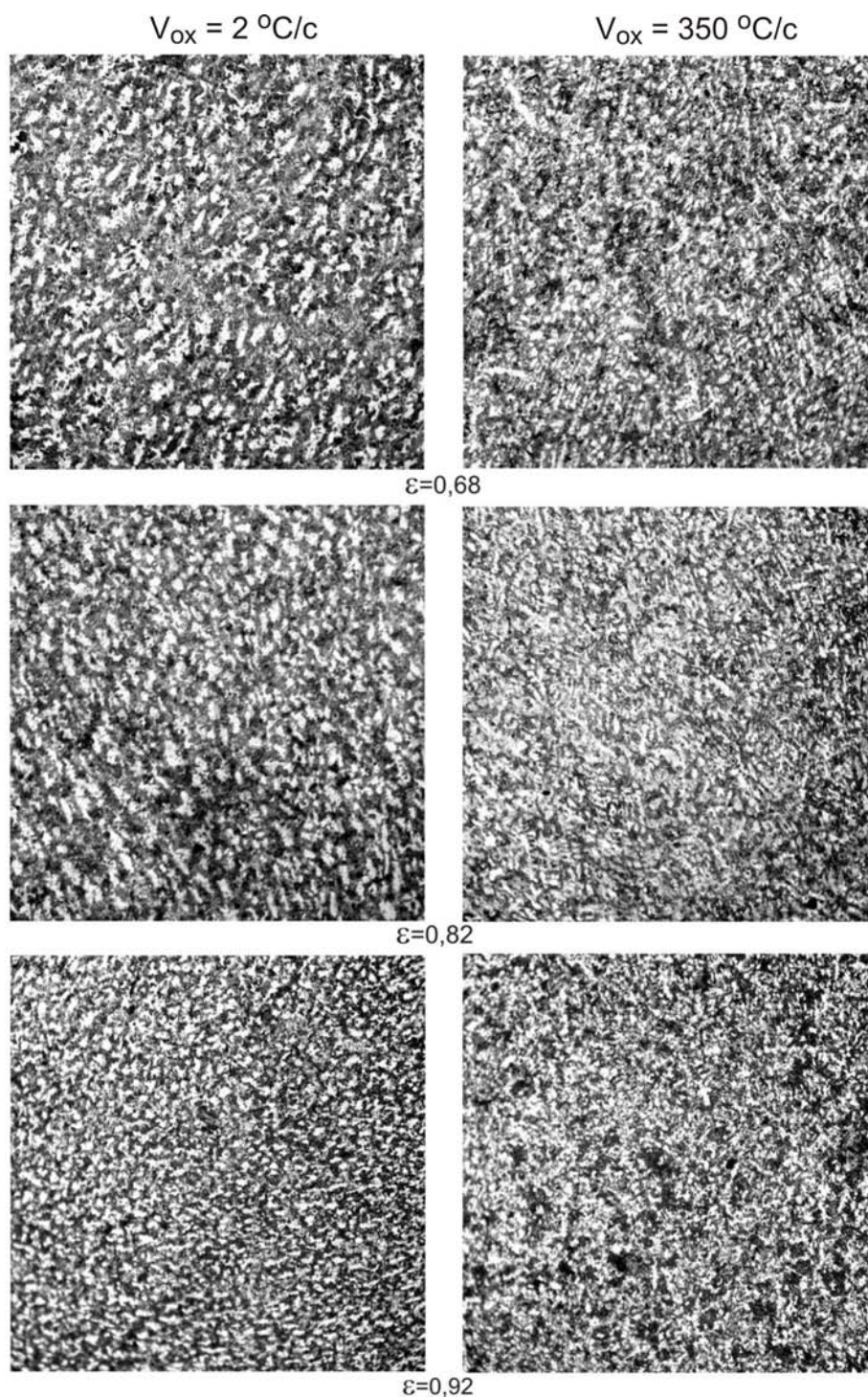
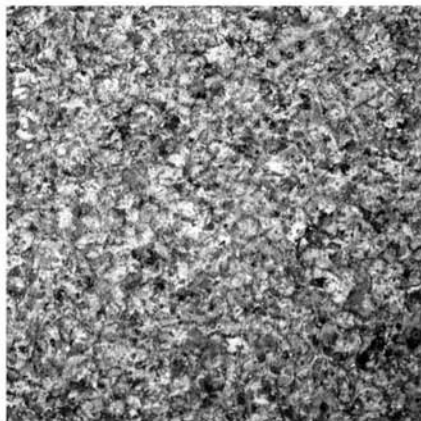
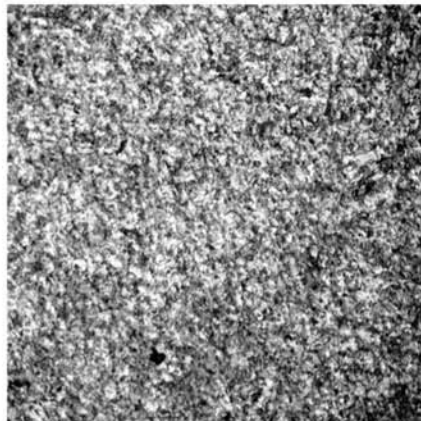


Рис. 2. Трансформація структури сталі 25ХГСТФЛ залежно від умов кристалізації ( $V_{ox}$ ) і ступеня обтискування ( $\epsilon$ ) при гарячій деформації.  $\times 100$ .

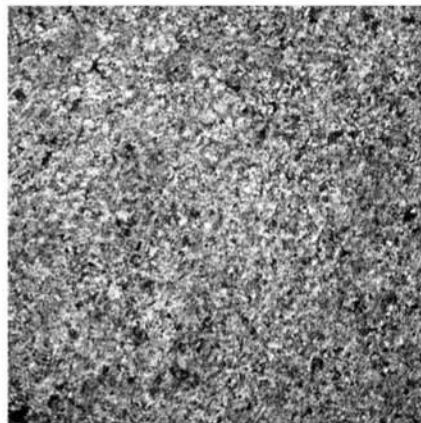
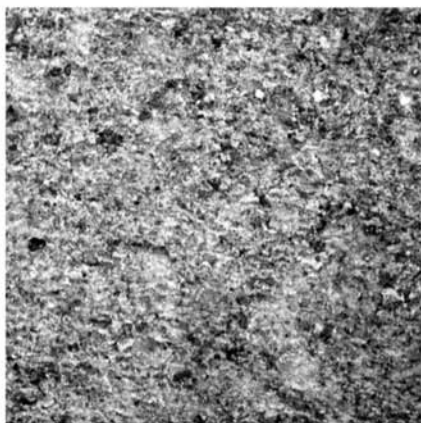
$V_{ox} = 2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{c}$



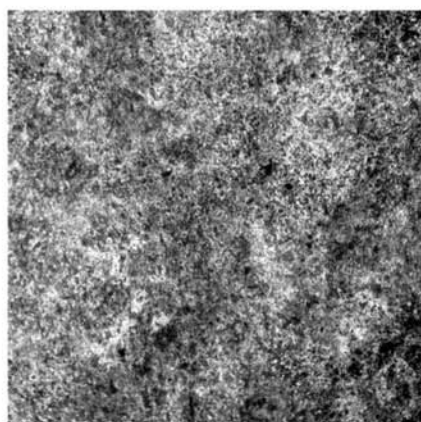
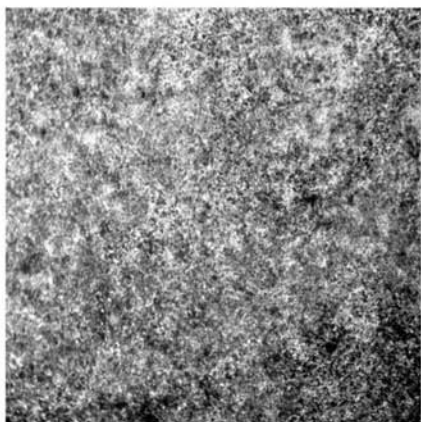
$V_{ox} = 350 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{c}$



$\varepsilon = 0,68$



$\varepsilon = 0,82$



$\varepsilon = 0,92$

Рис. 3. Трансформація структури сталі 45ХГСТФЛ залежно від умов кристалізації ( $V_{ox}$ ) і ступеня обтискування ( $\varepsilon$ ) при гарячій деформації.  $\times 100$ .

і темні складові структури) закономірно змінюються залежно від умов кристалізації сталей і ступеня обтискування при гарячій деформації (табл. 1).

Максимальні лінійні розміри структурних елементів характеризують структури сталей, що кристалізувались за умов нормального тепловідбору ( $V_{ox} = 2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{c}$ ) і піддавались меншим ступеням деформації.

Швидкісний тепловідбір при кристалізації ( $V_{ox} = 350 \text{ }^\circ\text{C}/\text{c}$ ) зумовлює суттєве подрібнення і підвищення рівномірності розподілу структурних складових у 1,5 – 2,0 рази після деформаційної обробки. Розміри елементів структури закономірно зменшуються відповідно зростанню ступеня обтискування при деформації литих заготовок.

Вплив деформаційно-термічної обробки на трансформацію дендритної структури оцінювали також за показником «пророблюваності», що характеризує подрібнення дендритної структури литого металу в процесі деформації [1, 2]. Залежно від умов кристалізації і величини обтискування показник пророблюваності визначається як щільність лінійних елементів у структурі деформованого металу. У даному випадку лінійні елементи – це осі дендритів вихідної структури (світла складова структури) і міждендритні ділянки (темна складова). За коефіцієнт пророблюваності ( $K_{пр}$ ) прийнято щільність системи лінійних елементів структури, що дорівнює середньому їх числу на одиниці площі січної площини, перпендикулярної до осі орієнтації.

В табл. 2 наведені значення коефіцієнта  $K_{пр}$  досліджуваних сталей залежно від вихідної литої структури заготовок і ступеня обтискування.

Таблиця 2

Коефіцієнти пророблюваності сталей залежно від ступеня деформації і умов кристалізації заготовок

Ступінь деформації, $\epsilon$	Сталь 25ХГСТФЛ		Сталь 45Л		Сталь 45ХГСТФЛ	
	$V_{ox}=2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{c}$	$V_{ox}=350 \text{ }^\circ\text{C}/\text{c}$	$V_{ox}=2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{c}$	$V_{ox}=350 \text{ }^\circ\text{C}/\text{c}$	$V_{ox}=2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{c}$	$V_{ox}=350 \text{ }^\circ\text{C}/\text{c}$
0,68	<u>0,040</u>	<u>0,062</u>	<u>0,051</u>	<u>0,122</u>	<u>0,057</u>	<u>0,165</u>
	0,042	0,064	0,056	0,126	0,068	0,165
0,82	<u>0,069</u>	<u>0,138</u>	<u>0,068</u>	<u>0,164</u>	<u>0,080</u>	<u>0,210</u>
	0,078	0,138	0,064	0,162	0,088	0,212
0,92	<u>0,120</u>	<u>0,181</u>	<u>0,132</u>	<u>0,200</u>	<u>0,151</u>	<u>0,348</u>
	0,119	0,178	0,134	0,198	0,154	0,350

Примітка: над рискою – світла складова структури (ділянки осей дендритів), під рискою – темна складова (міжосні ділянки)

Встановлено, що більш дисперсні вихідні литі структури швидко охолоджених при кристалізації, сталей характеризуються більш високими значеннями коефіцієнта пророблюваності. Підвищення значень коефіцієнта  $K_{пр}$  при зростанні швидкості тепловідбору від 2 до 350  $^\circ\text{C}/\text{c}$  змінюється приблизно у 1,5 рази (сталь 25ХГСТФЛ), 2,0 (сталь 45Л) і 2,5 (сталь 45ХГСТФЛ) рази. Відповідно до змін ступеня обтискування при гарячій деформації ( $\epsilon$ ) суттєво підвищується дисперсність структури сталей і значення коефіцієнта пророблюваності. Найбільшими значеннями однорідності структури і коефіцієнта пророблюваності після деформації характеризуються сталі, швидко охолоджені під час кристалізації. Це свідчить про те, що операції деформаційно-термічної обробки не усувають закладені при кристалізації особливості первинної

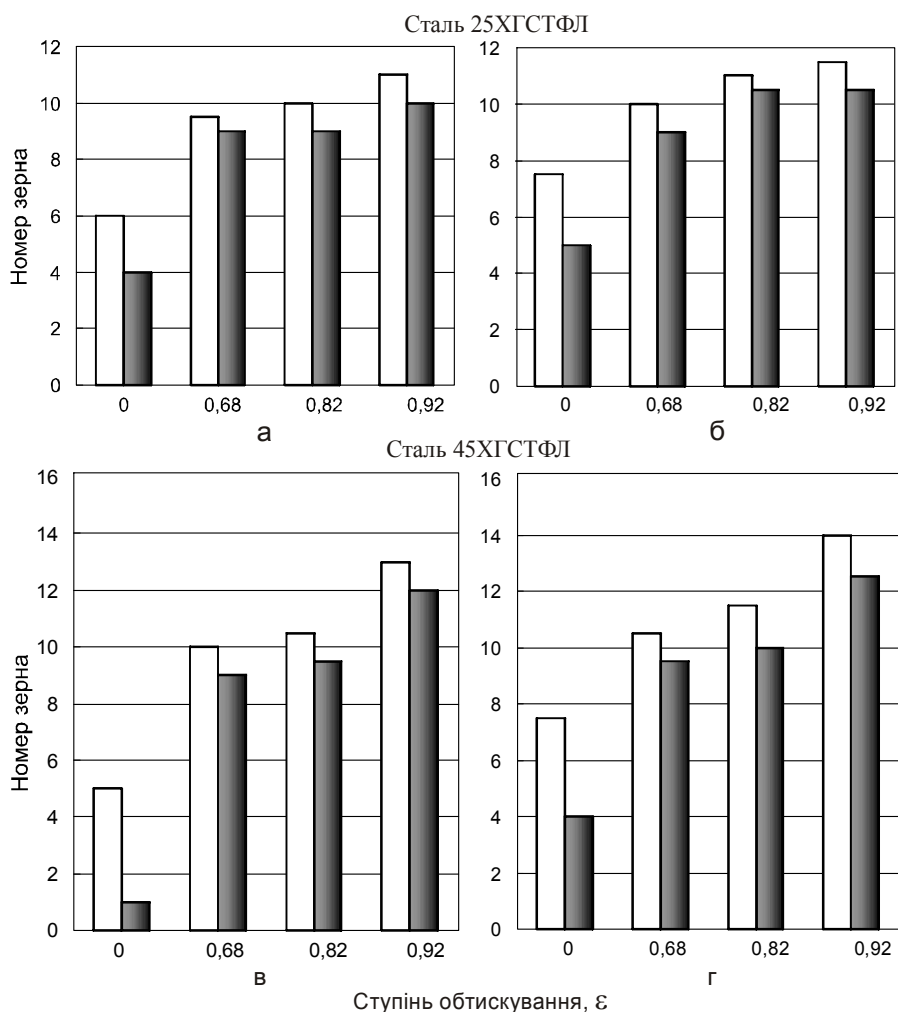


Рис. 4. Зміна розміру зерна сталей після гарячої деформації і термічної обробки залежно від умов кристалізації ( $V_{ox}$ ) і ступеня обтискування литої заготовки. а, в –  $V_{ox} = 2 \text{ }^\circ\text{C/s}$ , б, г –  $V_{ox} = 350 \text{ }^\circ\text{C/s}$ . □ – поверхнева зона, ■ – центральна зона.

литої структури (спадкові ознаки). Тобто показано, що керувати характеристиками структури і властивостями готової продукції після деформаційної обробки можна в певній мірі на стадії кристалізації і структуроутворення литих заготовок.

Відповідно з цим після деформаційної обробки спостерігаються закономірні зміни розміру зерна сталей нормальної і швидкісної кристалізації (рис. 4). Так, структура сталей нормального охолодження характеризується більшим розміром зерна при всіх ступенях обтискування як у поверхневих зонах, так і в центральній частині поковок. Відмінність розміру зерна поверхні і центра поковок в середньому становить 1 – 2 номери.

Для швидкоохолоджених сталей розмір зерна зменшується на 2 номери без суттєвих змін за перерізом поковки при всіх досліджених ступенях обтискування, що свідчить про більшу рівномірність і дисперсність структури деформованого металу.

## Структура і фізико-механічні властивості

Закладені при кристалізації позитивні ознаки швидкоохолоджених сталей зберігаються також на рівні тонкої кристалічної будови після деформаційної і термічної обробки (табл. 3). За даними рентгеноструктурних досліджень встановлено, що сталі з вихідною литою структурою інтенсивного охолодження характеризуються більшими значеннями уширення рентгенівських ліній (110) та (200) порівняно зі сталями нормального охолодження при кристалізації.

Таблиця 3

Фізичне уширення рентгенівських ліній після деформаційної і термічної обробки залежно від умов охолодження під час кристалізації литої заготовки сталей

Сталь	Умови охолодження	Уширення рентгенівських ліній, радіани	
		(110)	(200)
45Л	нормальне	0,0054	0,0124
	інтенсивне	0,0061	0,0159
45ХГСТФЛ	нормальне	0,0065	0,0162
	інтенсивне	0,0071	0,0200
25ХГСТФЛ	нормальне	0,0039	0,0120
	інтенсивне	0,0058	0,0134

Більш високі характеристики уширення ліній (110) свідчать про менші розміри елементів субструктури (областей когерентного розсіювання) та зростання величини густоти дислокацій. Сталі з швидкоохолодженою вихідною структурою характеризуються також більш високим рівнем мікронапружень кристалічної ґратки та дефектності кристалічної будови, що підтверджується відповідно високими значеннями уширення рентгенівських ліній (200).

Таким чином показано, що із зменшенням розмірів елементів спадковості здатність до їх збереження при наступних технологічних операціях підвищується. З огляду на одержані результати слід очікувати підвищення характеристик механічних властивостей сталей після деформації і термічної обробки в разі використання швидкоохолодженої при кристалізації литої заготовки.

Таблиця 4

Механічні властивості сталей після гарячої деформації і термічної обробки

Сталь	$\sigma_B$ , МПа		$\sigma_T$ , МПа		Твердість, НV		$\delta$ , %		$\psi$ , %		КСУ, МДж/м <sup>2</sup>	
	$V_{ox}$ , °C/c		$V_{ox}$ , °C/c		$V_{ox}$ , °C/c		$V_{ox}$ , °C/c		$V_{ox}$ , °C/c		$V_{ox}$ , °C/c	
	2	350	2	350	2	350	2	350	2	350	2	350
45Л	690	759	494	629	272	380	15,0	25,5	29,0	37,0	0,24	0,32
45ХГСТФЛ	905	984	725	802	340	610	14,0	19,0	21,0	25,0	0,26	0,37
25ХГСТФЛ	749	832	658	695	291	352	17,0	21,0	22,0	27,0	0,29	0,46

Механічні властивості досліджуваних сталей визначали на стандартних зразках після гарячої деформації із ступенем обтискування  $\epsilon = 0,82$  і стандартної термічної обробки: гартування від 850 °C і відпуску при 550 °C протягом 2 годин (сталі 45Л і 45ХГСТФЛ); гартування від 870 °C і відпуску при 200 °C протягом 1,5 години (сталь 25ХГСТФЛ). Порівняння характеристик механічних властивостей сталей

вихідної заготовки нормального і швидкісного охолодження при кристалізації показало суттєве підвищення показників міцності, пластичності і ударної в'язкості деформованих і термічно зміцнених зразків сталей з вихідних швидкоохолоджених при кристалізації заготовок (табл. 4).

Таким чином показано, що фазово-структурні особливості будови литого металу, відповідальні за формування механічних властивостей, успадковуються і певною мірою зберігаються при наступних операціях деформівної і термічної обробки сталей. Це відкриває додаткові резерви підвищення властивостей виробів машинобудування.

### Література

1. Лебедев В.Н., Троицкий В.П., Антощенко Ю.М. Определение степени прорабатываемости металла при деформировании // Изв. вузов. Черн. металлургия. – 1977. – № 3. – С. 109 – 111.
2. Левченко Г.В., Демина Е.Т., Мединский Г.А. Трансформация дендритной структуры при производстве железнодорожных осей // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2008. – № 2. – С. 74 – 76.

Одержано 09.01.09

**С.Е. Кондратюк, Е.Н. Стоянова**

### **Наследственность и трансформация структуры литых сталей при горячей деформации и термической обработке**

#### **Резюме**

Исследовано влияние исходной литой структуры конструкционных сталей, формирующийся в условиях нормального и интенсивного теплоотвода при кристаллизации, на их структуру и свойства после деформационной и термической обработки. Показано, что быстроохлажденные стали сохраняют наследственные признаки исходной литой структуры и обеспечивают более высокие механические свойства деформированного металла.

**S.Ye. Kondratyuk, E.N. Stoyanova**

### **Heredity and transformation of cast steel structure at hot deformation and thermal treatment**

#### **Summary**

The influence of primary structure of cast structural steel castings formed under normal and intensive heatsink at crystallization on their structure and properties after deformation and thermal treatment is studied. It is shown that rapidly cooled steels retain hereditary characters of primary cast structure and provide high mechanical properties of deformed metal.