

Модифікування сталі нанорозмірними порошковими інокуляторами

С. Є. Кондратюк, доктор технічних наук, професор
О. М. Стоянова, кандидат фізико-математичних наук
В. М. Щеглов, кандидат технічних наук
Ж. В. Пархомчук

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

Досліджено вплив нанорозмірних інокулюючих добавок Al_2O_3 і SiC на кристалізацію і структуроутворення сталі 20Л. Суттєве подрібнення і зміна морфології литої структури пояснюється утворенням додаткових зародків кристалізації.

Одержання дрібної, однорідної і щільної структури, що забезпечує високий рівень фізико-механічних властивостей сталевих виливків, зокрема їх опір крихкому руйнуванню, є однією з актуальних проблем сучасного ливарного виробництва.

Застосування засобів зовнішнього впливу на розплав під час кристалізації, модифікування добавками поверхнево активних рідкісноземельних і лужноземельних елементів, або тугоплавких дисперсних часток, кристалічні решітки яких задовольняють вимогам структурної і розмірної відповідності [1], дозволяє в певній мірі поліпшити характеристики структури і підвищити властивості литих сталей. Розглядаються також і інші механізми модифікування, які реалізуються за рахунок рафінуючого або дегазуючого впливу добавок, зміни складу та будови рідкої і твердої фаз, проявів металургійної і структурної спадковості [2 – 5]. В останні роки спостерігається зростання наукового і промислового інтересу до використання нанокристалічних матеріалів з високодисперсною структурою і розмірами (1 – 100 нм). Така будова визначає їх незвичайні властивості, здатність до якісних змін фізико-хімічних властивостей матеріалів при мінімальних варіаціях атомно-структурних параметрів [6 – 8]. Проте широке їх впровадження у промисловості поки що обмежене у зв'язку з недостатньо відпрацьованими технологіями їх введення в розплав і високою вартістю їх виготовлення. Найбільш доцільним на сьогодні є процес модифікування при якому зародкоутворюючі нанофази вносяться в розплав у складі спеціальних лігатур.

Виходячи з цього досліджено вплив нанодобавок Al_2O_3 (аеросил) і карбиду кремнію SiC на процеси кристалізації і структуроутворення сталі 20Л (0,23 % С; 0,36 % Si; 0,62 % Mn; S до 0,035 %; P до 0,025 % по масі).

Вказані модифікуючі добавки вводили в розплав сталі перед розливкою від температури 1560 °С у вигляді лігатури на основі алюмінію

(рис. 1), що забезпечувало вміст нанорозмірних компонентів (Al_2O_3 , SiC) в сталі з розрахунку до 0,09 % і до 0,05 % відповідно.

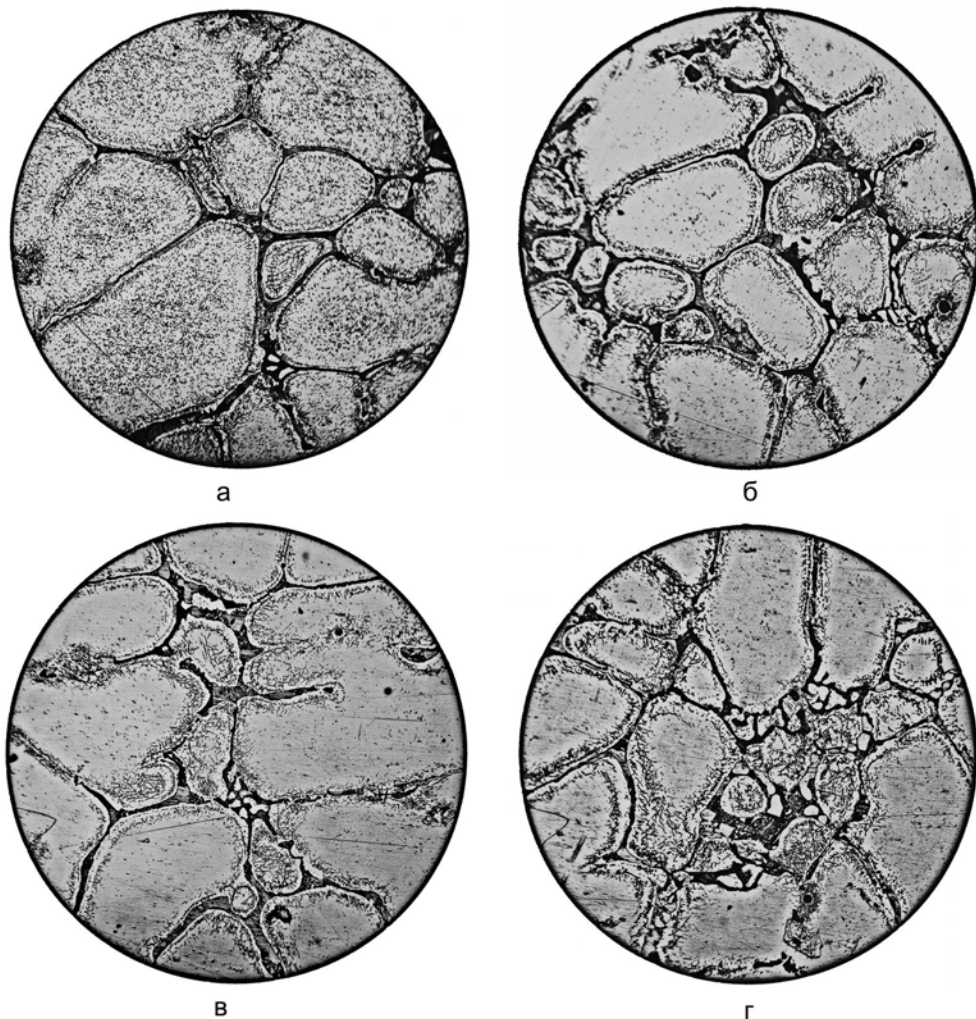


Рис. 1. Структура лігатур на основі алюмінію з вмістом нанорозмірних Al_2O_3 (а, б) і SiC (в, г). х 400.

Металографічно встановлено, що після кристалізації виливків діаметром 35 мм і висотою 60 мм у піщаній формі із середньою швидкістю тепловідбору $V_{\text{ox}} = 5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ структура сталі з добавками нанопорошків суттєво відрізняється від вихідної (немодифікованої) підвищеною дисперсністю і відмінністю морфології литої структури (рис. 2). Так, розмір зерна литої структури внаслідок використання модифікуючої добавки лігатури з нанорозмірним Al_2O_3 (аеросил) зменшується від номера -2 до номера 1, а при використанні лігатури з нанорозмірним SiC відповідно до номера 0 згідно ГОСТ 5639-82. Це свідчить про значний внесок у процес кристалізації і структуроутворення механізму гетерогенного зародкоутворення і збільшення кількості зародків кристалізації зумовлених наявністю в розплаві нанорозмірним фаз аеросилу або карбиду кремнію.

Плавлення і кристалізація

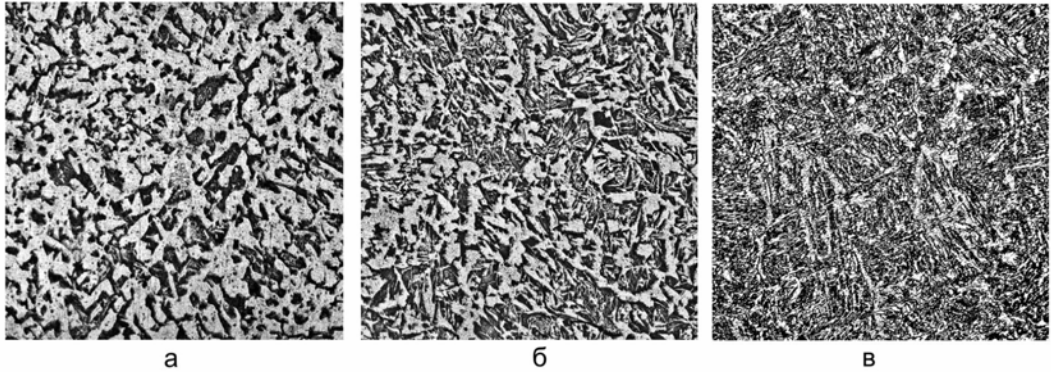


Рис. 2. Трансформація структури сталі 20Л при модифікуванні нанорозмірними інокуляторами. а – немодифікована сталь, б – модифікування аеросилом, в – модифікування нанорозмірним карбідом кремнію. $\times 400$.

Слід відзначити також суттєвий вплив вказаних нанофаз на дендритну будову сталі. Встановлено, що дисперсність дендритної структури (ДДС), оцінювана за сумарною кількістю осей дендритів і міжосьових ділянок на одиницю довжини (мм^{-1}), підвищується від 5,6 (немодифікована сталь) до 10,2 при модифікуванні нанорозмірним аеросилом і до 9,4 при модифікуванні сталі нанорозмірним карбідом кремнію.

Щільність дендритної структури (ЩДС), що характеризується відношенням площі осей (дендритів) до площі міждендритних ділянок також закономірно підвищується при застосуванні нанорозмірних добавок аеросилу і карбіду кремнію до розплаву сталі, що кристалізується – від 0,72 (немодифікована сталь) до 1,15 (нанорозмірний Al_2O_3) і до 0,92 (нанорозмірний SiC). Цей показник в певній мірі характеризує об'ємне співвідношення осьових і міжосних ділянок литої структури, вказує на зміну складу твердої фази при кристалізації і на покращення дендритної будови модифікованої сталі.

При введенні в розплав вказаних нанопорошків спостерігається також закономірні зміни тонкої кристалічної будови сталі. Так, за результатами рентгеноструктурного аналізу при цьому підвищуються показники фізичного уширення рентгеновських ліній (110) і відповідно густоти дислокацій і зменшення розмірів блоків мозаїки при збереженні певного вихідного рівня мікронапружень II роду (табл. 1).

Таблиця 1

Характеристики тонкої кристалічної структури сталі 20Л модифікованої нанорозмірними інокуляторами

Режим обробки	Уширення рентгеновської лінії (110), рад	D, нм	$\Delta a/a$	ρ , см^{-2}
1	$0,30 \cdot 10^{-2}$	91,34	$0,62 \cdot 10^{-4}$	$3,99 \cdot 10^{11}$
2	$0,38 \cdot 10^{-2}$	86,89	$0,61 \cdot 10^{-4}$	$4,76 \cdot 10^{11}$
3	$0,35 \cdot 10^{-2}$	88,65	$0,62 \cdot 10^{-4}$	$4,29 \cdot 10^{11}$

Примітка: 1 – сталь без модифікуючої добавки, 2 – модифікування Al_2O_3 , 3 – модифікування SiC .

Плавлення і кристалізація

Це створює передумови для підвищення характеристик механічних властивостей сталі найбільш суттєвого при модифікуванні нанорозмірними добавками карбиду кремнію (табл. 2).

Таблиця 2

Механічні властивості сталі 20Л залежно від характеру модифікування нанорозмірними інокуляторами

Режим обробки	σ_b , МПа	σ_T , МПа	ψ , %	δ , %	Твердість HV
1	223	180	37	28	123
2	368	320	40	34	136
3	390	346	39	32	140

Примітка: 1 – сталь без модифікуючої добавки, 2 – модифікування Al_2O_3 , 3 – модифікування SiC.

Особливо слід відзначити суттєве підвищення значень характеристик роботи руйнування сталі: ударної в'язкості (КСУ) та її складових – роботи зародження тріщини (a_z) та роботи розповсюдження (поширення) тріщини (a_p). Визначення ударної в'язкості здійснювали згідно ГОСТ 9454-78 на стандартних зразках з надрізом Менаже, а роботи зародження і поширення тріщини на зразках з наведеною тріщиною [9]. Встановлено, що ударна в'язкість сталі при модифікуванні нанодобавками аеросилу підвищується від 26 Дж/см² (немодифікована сталь) до 44 Дж/см², а при модифікуванні нанорозмірним карбідом кремнію до 40 Дж/см². Суттєвий внесок при цьому у роботу руйнування вносить значне підвищення значень роботи поширення тріщини (табл. 3). Більш високий рівень показників ударної в'язкості і роботи поширення тріщини при модифікуванні сталі вказаними нанорозмірними інокуляторами узгоджується з уявленнями Петча-Хола [10, 11] щодо визначального впливу розміру зерна на роботу поширення тріщини.

Таблиця 3

Вплив нанорозмірних інокуляторів на характеристики руйнування сталі 20Л, Дж/см²

Режим обробки	КСУ	a_z	a_p
1	26	19	7
2	44	28	16
3	40	26	14

Примітка: 1 – сталь без модифікуючої добавки, 2 – модифікування Al_2O_3 , 3 – модифікування SiC.

Таким чином експериментально встановлено, що застосування нанорозмірних порошкових інокуляторів, зокрема у складі лігатури на основі алюмінію, зумовлює суттєве зростання кількості зародків кристалізації в розплаві під час кристалізації і відкриває нові технологічні можливості цілеспрямованого подрібнення литої структури сталей у виливках,

підвищення їх механічних властивостей і опору крихкому руйнуванню при динамічних навантаженнях.

Література

1. Марукович Е.І., Стеценко В.Ю. Модифицирование сплавов. – Минск: Беларус. навука, 2009. – 196 с.
2. Богачев И.Н. Металлография чугуна. – М.: Машиностроительная литература, 1952. – 368 с.
3. Никитин В.И., Никитин К.В. Наследственность в литых сплавах. – М.: Машиностроение, 2005. – 510 с.
4. Кондратюк С.Е., Стоянова Е.Н., Щеглов В.М. Наследственное модифицирование сталей дисперсно-структурированными компонентами шихты // Процессы литья. – 2013. – № 2. – С. 19 – 24.
5. Кондратюк С.Е., Стоянова Е.Н., Щеглов В.М. Структура и свойства сталей при модифицировании дисперсно-структурированными модификаторами // Процессы литья. – 2015. – № 2. – С. 56 – 63.
6. Иванова В.С., Шанявский А.А. Нанонаука как теория управления структурой и свойствами наносистем // Металлургия машиностроения. – 2008. – № 6. – С. 31 – 35.
7. Кириенко С.В. Наноконструированные металлы и материалы // Цветные металлы. – 2008. – № 10. – С. 70 – 77.
8. Иванова В.С., Фолманис Г.Э. От наноматериалов – к интеллектуальным технологиям // – М.: Металлургия машиностроения. – 2007. – № 1. – С. 2 – 10.
9. Дроздовський Б.А., Фридман Я.Б. Влияние трещин на механические свойства конструкционных сталей. – Металлургиздат, 1960. – 180 с.
10. E.O. Hall // Proc. Phys. Soc. Seriesю. – 1951. – 64 B. – P. 747.
11. N.J. Petch // Proc. Swampscott Couf. – 1959. – MJT. Press. – P. 54.

Одержано 17.09.15

С. Е. Кондратюк, Е. Н. Стоянова, В. М. Щеглов, Ж. В. Пархомчук

Модифицирование стали наноразмерными порошковыми инокуляторами

Резюме

Исследовано влияние наноразмерных инокулирующих добавок Al_2O_3 и SiC на кристаллизацию и структурообразование стали 20Л. Значительное измельчение и изменения морфологии литой структуры объясняется образованием дополнительных зародышей кристаллизации.

S. Ye. Kondratyuk, E. N. Stoianova, V. M. Scheglov, Z. V. Parkhomchuk

Modification of steel by nanoscale powder inoculators

Summary

The study shows the influence of the nanoscale inoculating additives (Al_2O_3 and SiC) on crystallization and structure formation of 20Л steel. Significant changes in the morphology and reduction of grain size due to the formation of additional crystallization nuclei.