

Вплив режиму охолодження та хімічного складу на формування дендритної структури зливка та безперервнолитих заготовок

О. І. Бабаченко, кандидат технічних наук

К. Г. Дьоміна, кандидат технічних наук

А. В. Книш, кандидат технічних наук

О. А. Шпак

Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, Дніпропетровськ

Досліджено особливості дендритної структури зливка та безперервнолитих заготовок з вуглецевих і низьколегованих сталей різного діаметра. Встановлено, що при кристалізації безперервнолитих заготовок хімічний склад сталі, поряд з прискореним охолодженням, є одним з головних факторів, які визначають параметри дендритної структури.

Світовий досвід показує, що заміна зливка, відлитого в виливницю, безперервнолитою заготовкою (БЛЗ) призводить до суттєвих змін в технології виробництва сталі на стадіях розкислення, розливання, твердіння, а також вносить певні корективи в існуючі технологічні режими виробництва металопродукції. Докорінна зміна технології виробництва сталі вимагає проведення комплексних досліджень якості металопродукції на всіх стадіях виробництва, починаючи від її кристалізації.

Тому мета даної роботи полягала в дослідженні особливостей дендритної структури безперервнолитих заготовок з вуглецевих і низьколегованих сталей різного діаметра, а також у порівняльному аналізі дендритної структури зливка сифонного розливання діаметром 485 мм (мартенівський процес отримання сталі) і безперервнолитих заготовок діаметром 470 і 450 мм (електросталеплавильний процес отримання сталі).

Матеріал дослідження – зразки темплетів безперервнолитих заготовок і зливка сифонного розливання з вуглецевих і низьколегованих сталей різного діаметра виробництва ВАТ «МЗ «Дніпросталь» та ПАТ «Інтерпайп НТЗ». Хімічний склад і розміри зливка та безперервнолитих заготовок наведено в табл. 1.

Зразки для металографічного аналізу відбирали у поверхневих шарах, на відстані $\frac{1}{2}$ радіуса та в центральних шарах темплетів.

Дендритну структуру виявляли травленням у гарячому розчині пікрата натрію. Металографічні дослідження виконані на мікроскопі «Axiovert 200M MAT» виробництва фірми «Carl Zeiss», кількісний аналіз

Плавлення і кристалізація

Таблиця 1

Хімічний склад темплетів зливка та БЛЗ

Марка сталі	Литий метал	Вміст елементів, % (по масі)				
		C	Mn	Si	P	S
2	Зливков діаметр 485 мм	0,61	0,73	0,35	0,016	0,004
	БЛЗ, діаметр 470 мм	0,57	0,70	0,29	0,014	0,008
	БЛЗ, діаметр 450 мм	0,57	0,73	0,29	0,011	0,005
Вимоги ГОСТ 10791 – 2011		0,55 – 0,63	0,50 – 0,90	0,22 – 0,45	≤ 0,030	≤ 0,025
ER7	БЛЗ, діаметр 450 мм № 1	0,48	0,73	0,29	0,008	0,005
ER7	БЛЗ, діаметр 450 мм № 2	0,46	0,65	0,32	0,007	0,002
ER7	БЛЗ, діаметр 450 мм № 3	0,47	0,65	0,34	0,007	0,002
Вимоги EN 13262 (D)		≤ 0,52	≤ 0,80	≤ 0,40	≤ 0,020	≤ 0,015
3Г2С	БЛЗ, діаметр 290 мм	0,41	1,68	0,49	0,015	0,010
09Г2С	БЛЗ, діаметр 150 мм	0,10	1,43	0,52	0,020	0,004

виконано у програмі «Axiovision 4.6.3». Визначення металографічних характеристик проводили на поздовжніх шліфах. Це забезпечило більш високу точність результатів вимірів, у порівнянні з поперечними шліфами, оскільки дозволило врахувати нахил дендритів до поверхні заготовки (у вертикальній площині) [1].

Приймаючи, що в площині шліфа осі дендритних кристалів мають овальну форму, розмір дендритів визначали як середнє арифметичне великої і малої осі овалу. Ширину міждендритних просторів вимірювали в довільних напрямках. Обсяг вибірки – 200 вимірювань.

Відомо, що після завершення тверднення макроструктура сталевих безперервнолитих заготовок, як і макроструктура зливка, відлитого у виливницю, складається з трьох характерних кристалічних зон (рис. 1):

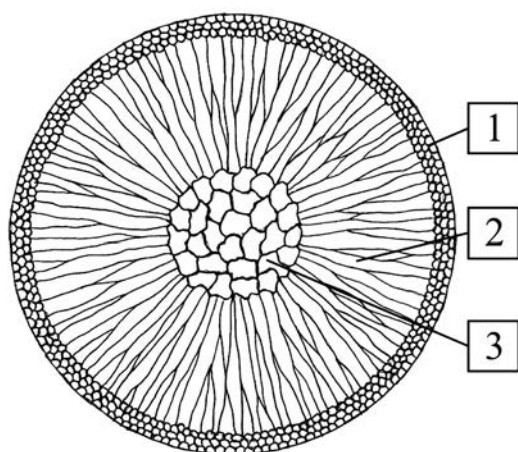


Рис. 1. Схема будови безперервнолитої заготовки. 1 – зона дрібних рівноосьових дендритів (дрібнозерниста коринка), 2 – зона стовпчастих дендритів, 3 – зона рівноосьових різно орієнтованих дендритів.

- коркова зона товщиною в кілька міліметрів (рис. 1, 1), що складається з дрібних кристаліків, близьких до рівноосьових, осі першого порядку яких розташовуються переважно перпендикулярно до поверхні зливка;

- зона стовпчастих (дендритних) кристалів (рис. 1, 2), осі першого порядку яких спрямовані практично перпендикулярно (або з невеликим відхиленням) до поверхні зливка (у разі заливки сильно перегрітої сталі стовпчасти кристали досягають осі зливка і таке явище називається транскристалізацією);

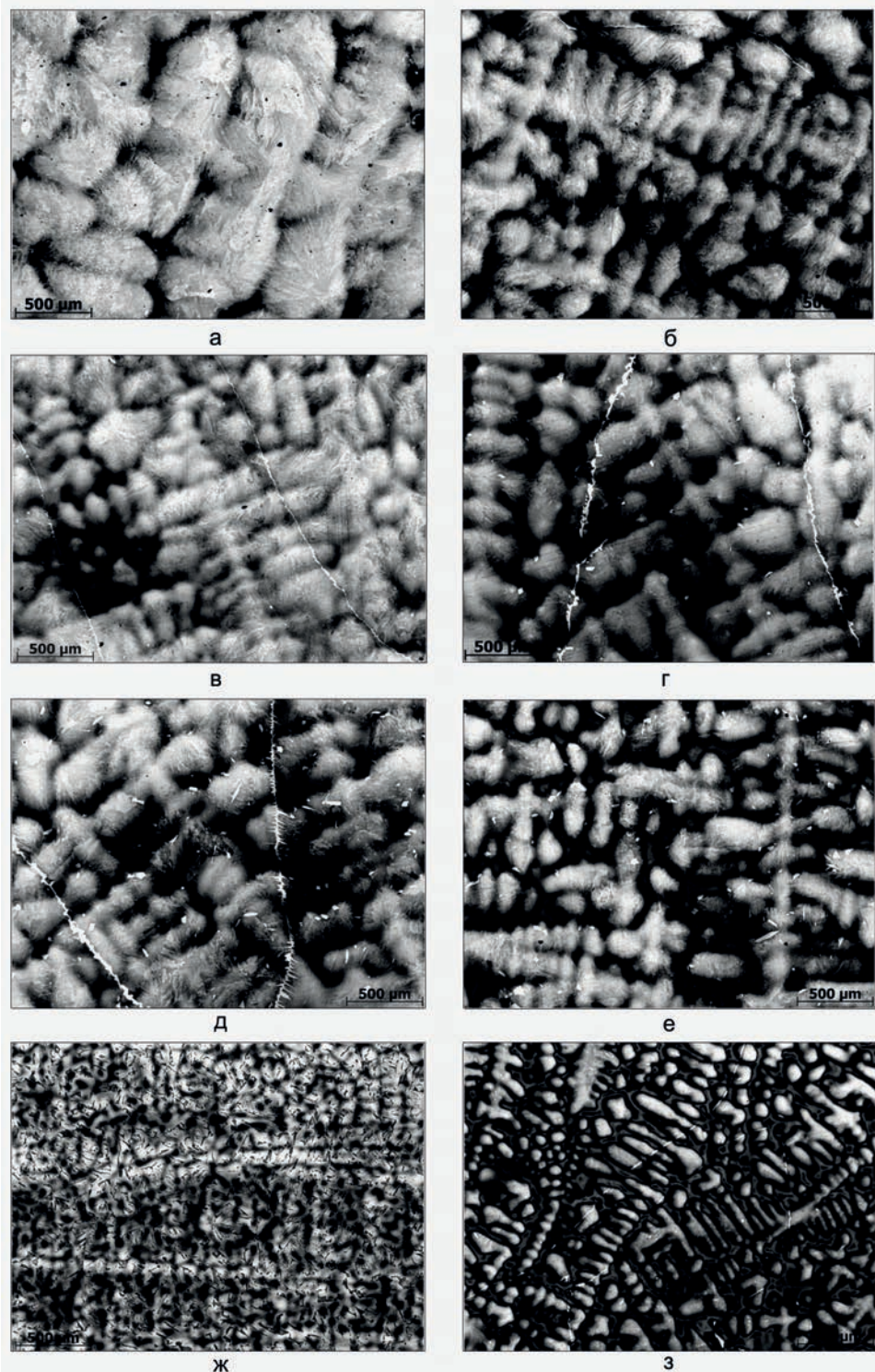


Рис. 2. Дендритна структура на відстані $\frac{1}{2}$ радіуса зливка та безперервнолитих заготовок з вуглецевих і низьколегованих сталей. а – в – сталь 2, г – е – сталь ER 7, ж – сталь 09Г2С, з – сталь 32Г2С. а – зливка діаметром 485 мм, б – БЛЗ діаметром 470 мм, в – е – БЛЗ діаметром 450 мм, ж – БЛЗ діаметром 150 мм, з – БЛЗ діаметром 290 мм. x 20.

Плавлення і кристалізація

• зона неорієнтованих рівновісних кристалів (рис. 1, 3), що займає всю середню частину зливка і складається з великих кристалів з безладним напрямком осей першого порядку.

Становило інтерес визначити, як в залежності від розміру поперечного перерізу змінюється дендритна структура литих заготовок. Фотографії дендритної структури на відстані $\frac{1}{2}$ радіуса представлено на рис. 2, результати кількісного металографічного аналізу – в табл. 2.

Таблиця 2

Результати металографічного аналізу дендритної структури зразків зливка та БЛЗ

Марка сталі	Литий метал, діаметр, мм	Зразок	Об'ємна частка ділянок, %		Середній розмір, мкм		Щільність дендритної структури в об'ємі сплаву, мм ⁻¹
			міждендритні простори	дендритні осі	міждендритні простори	дендритні осі	
2	485	П	15,3	84,7	55,0	155,0	58,0
		$\frac{1}{2}$ R	17,5	82,5	100,0	500,0	7,0
		Ц	20,1	79,9	140,0	540,0	5,6
	470	П	15,5	84,5	50,0	80,0	150,0
		$\frac{1}{2}$ R	18,0	82,0	90,0	235,0	24,0
		Ц	20,2	79,8	95,0	355,0	12,0
	450	П	17,3	82,7	40,0	75,0	192,6
		$\frac{1}{2}$ R	17,9	82,1	75,0	240,0	24,6
		Ц	20,0	80,0	85,0	350,0	13,4
ER 7	450, №1	П	15,7	84,3	35,0	75,0	210,0
		$\frac{1}{2}$ R	18,0	82,0	70,0	250,0	24,8
		Ц	19,8	80,2	75,0	350,0	14,2
	450, №2	П	15,2	84,8	40,0	80,0	176,4
		$\frac{1}{2}$ R	17,3	82,7	65,0	270,0	22,8
		Ц	19,9	80,1	70,0	360,0	14,0
	450, №3	П	16,5	83,5	30,0	80,0	210,0
		$\frac{1}{2}$ R	18,5	81,5	65,0	265,0	22,4
		Ц	19,7	80,3	70,0	370,0	13,2
32Г2С	290	П	25,4	74,6	30,0	50,0	398,0
		$\frac{1}{2}$ R	27,6	72,4	60,0	100,0	100,0
		Ц	31,0	69,0	60,0	140,0	64,0
09Г2С	150	П	21,3	78,8	40,0	70,0	231,0
		$\frac{1}{2}$ R	23,9	76,1	65,0	120,0	74,4
		Ц	24,9	75,1	70,0	145,0	55,0

Примітка: П – поверхневі шари, $\frac{1}{2}$ R – на відстані $\frac{1}{2}$ радіуса, Ц – центральні шари БЛЗ.

Будова дендритної структури як за перерізом зливка, так і безперервнолитої заготовки має загальні тенденції, які повністю відображають відомі уявлення про формування структури сталевих зливок [2]. У поверхневих шарах при твердненні утворюються найдрібніші кристали. В напрямку від поверхні до центральних шарів розмір дендритів збільшується, тобто чітко простежується перехід від зони стовпчастих кристалів до центральної зони рівновісних кристалів.

Результати металографічного аналізу (табл. 2) показали, що об'ємна частка міждендритних просторів (лікваційних ділянок) і дендритних осей не залежить від способу виробництва та розливання вуглецевої сталі марки 2 і має практично однакові значення для зливка діаметром 485 мм і безперервнолитої заготовки діаметром 470 і 450 мм.

В середньому, як за перерізом зливка, так і БЛЗ (діаметром майже однаковий – 485 і 470 мм) розмір елементів дендритної структури змінюється в 3 рази, при цьому її щільність у поверхневих і центральних шарах відрізняється на порядок. Більш інтенсивний режим охолодження БЛЗ в мідному водоохолодному кристалізаторі призводить до того, що розмір елементів дендритної структури за перерізом БЛЗ у 1,5 рази менший, а її щільність у 2,5 рази вища, ніж за перерізом зливка. Оскільки поверхневі шари охолоджуються швидко як при контакті зі стінками виливниці, так і мідного кристалізатора, а центральні шари повільно, то прискорене охолодження БЛЗ в зоні вторинного охолодження, де відбувається тверднення зони стовпчастих кристалів, викликає найбільшу різницю розмірів дендритної структури та її щільності, яка і спостерігається на відстані $\frac{1}{2}$ радіуса (табл. 2). Ці ж особливості характерні також і для дендритної структури БЛЗ діаметром 450 мм.

Таким чином, при практично однаковому діаметрі та хімічному складі метал безперервнолитої заготовки відрізняється більш щільною дендритною структурою і, як наслідок, більш рівномірним розподілом хімічних елементів, що утворився в результаті дендритної ліквідації.

Визначено, що об'ємні частки міждендритних просторів (лікваційних ділянок) і дендритних осей, їх середні розміри за перерізом безперервнолитої заготовки діаметром 450 мм із вуглецевих сталей марок 2 і ER 7, також мають майже однакові значення (табл. 2). Це показує, що, незважаючи на підвищений вміст вуглецю і марганцю в сталі марки 2 в порівнянні з хімічним складом сталі марки ER 7 (табл. 1), основний вплив на формування дендритної структури за перерізом безперервнолитої заготовки надає режим прискореного охолодження в кристалізаторі та в зоні вторинного охолодження.

Досліджено особливості дендритної структури безперервнолитої заготовки зі сталі ER 7 з максимально і мінімально допустимим стандартом EN 13262 вмістом марганцю та кремнію. При цьому відношення вмісту марганцю до вмісту кремнію ($Mn \% / Si \%$) склало 2,52 і 2,0 для БЛЗ № 1 і № 2, 3 відповідно.

В результаті металографічного аналізу було визначено, що при однаковому співвідношенні об'ємних часток міждендритних просторів і

Плавлення і кристалізація

дендритних осей за перерізом БЛЗ № 1 – 3: 15 % і 85 % – в поверхневих шарах, 20 % і 80 % – в центральних шарах, на відстані $\frac{1}{2}$ радіуса заготовки та в центральній частини БЛЗ № 2 – 3 спостерігається незначне (до 20 мкм) збільшення дендритних осей. Це викликано меншим вмістом марганцю в плавках сталі ER 7 БЛЗ № 2, 3 в порівнянні з БЛЗ № 1 (табл. 1). Інші металографічні характеристики мають практично однакові значення (табл. 2). Це, як було сказано вище, свідчить про основний вплив прискореного охолодження на формування дендритної структури за перерізом БЛЗ діаметром 450 мм із вуглецевої сталі ER 7.

Положення досліджуваних сталей на політермічному розрізі частині діаграми стану Fe – C (а) і на ізотермічному розрізі поверхні первинної феритної і перитектичної фазових областей кристалізації на діаграмі Fe – Mn – C (б) показано на рис. 3. Визначено, що сталь 32Г2С знаходиться в одній фазовій області зі сталлю ER 7. Обидві фази кристалізуються з утворенням первинної фази δ -фериту, а потім аустеніту.

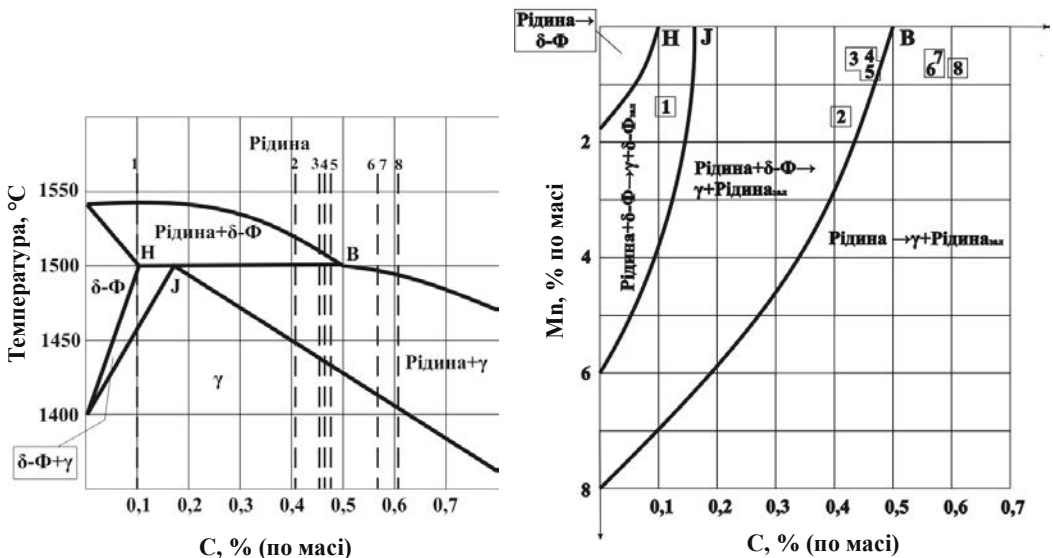


Рис. 3. Політермічний розріз частини діаграми стану Fe – C (а) та ізотермічний розріз поверхні первинноферитної і перитектичної фазових областей кристалізації на діаграмі Fe – Mn – C (б). 1 – сталь 09Г2С, БЛЗ діаметром 150 мм, 2 – сталь 32Г2С, БЛЗ діаметром 290 мм, 3 – сталь ER 7, БЛЗ діаметром 450 мм № 1, 4 – сталь ER 7, БЛЗ діаметром 450 мм № 2, 5 – сталь ER 7, БЛЗ діаметром 450 мм № 3, 6 – сталь 2, БЛЗ діаметром 450 мм, 7 – сталь 2, БЛЗ діаметром 470 мм, 8 – сталь 2, зливок діаметром 485 мм.

При аналізі дендритної структури спостерігається підвищена кількість ліквацийних (міждендритних) ділянок по всьому перерізу БЛЗ з низьколегованої сталі 32Г2С порівняно з вуглецевими сталями марки 2 і ER 7 (рис. 2 і табл. 2). У поверхневих шарах, де вплив прискореного охолодження найбільш сильний, розмір дендритних осей зменшився на 30 %, а на відстані $\frac{1}{2}$ радіуса та в центральних шарах заготовки – на 50 % в порівнянні з даними характеристиками для БЛЗ з вуглецевої сталі.

Беручи до уваги, що сталі 32Г2 і ER 7 знаходяться поруч в одній фазовій області кристалізації і різницю діаметрів аналізованих заготовок (~ 35 %), можна стверджувати, що в поверхневих шарах основний вплив на розмір дендритної структури зумовлює режим прискореного охолодження, а на відстані $\frac{1}{2}$ радіусу і в центральних шарах заготовки – хімічний склад – легування сталі 32Г2С марганцем і кремнієм.

Для підтвердження цього проаналізовано особливості дендритної структури безперервнолитої заготовки діаметром 150 мм з низьколегованої сталі 09Г2С.

Результати металографічного аналізу дендритної структури БЛЗ діаметром 150 мм із сталі 09Г2С представлені на рис. 2 і в табл. 2.

Раніше в роботі [3] були досліджені особливості дендритної будови БЛЗ 335 x 400 мм в залежності від вмісту вуглецю в сталі 09Г2С.

У роботі виконано порівняльний металографічний аналіз дендритної структури за перерізом БЛЗ 335 x 400 мм (виробництва ВАТ «Дніпровський металургійний комбінат ім. Ф. Є. Дзержинського») і БЛЗ діаметром 150 мм (ВАТ «МЗ «Дніпросталь») зі сталі 09Г2С (плавки близького хімічного складу). Визначено, що дендритні осі та міждендритні простори мають майже однакові розміри в обох заготовках: близько 110, 180 і 215 мкм у поверхневих шарах, на відстані $\frac{1}{2}$ радіуса та центральних шарах відповідно.

Але при однакових розмірах дендритних осей ліквідаційні ділянки розподілені за перерізом БЛЗ діаметром 150 мм більш рівномірно. Різниця об'ємної частки ліквідаційних (міждендритних) просторів у поверхневих і центральних шарах становить менше 5 %, а по перерізу БЛЗ 335 x 400 мм ця різниця становить більше 10 %.

Якщо з певною часткою допущення прийняти, що охолодження в поверхневих шарах обох заготовок протікає однаково, то на відстані $\frac{1}{2}$ радіуса і в центральних шарах швидкість тепловідведення та росту кристалів буде відрізнятись. Однак, незважаючи на різну форму, розмір поперечного перерізу та режими прискореного охолодження БЛЗ на підприємствах ВАТ «Дніпровський металургійний комбінат ім. Ф. Є. Дзержинського» та ВАТ «МЗ «Дніпросталь», близький хімічний склад плавки сталі 09Г2С в зазначених плавках дозволив отримати дендритну структуру з майже однаковими розмірами в БЛЗ 335 x 400 і діаметром 150 мм.

Таким чином в результаті порівняльного аналізу зливка сифонного розливання діаметром 485 мм і безперервнолитої заготовки діаметром 470 і 450 мм встановлено, що при практично однаковому діаметрі та хімічному складі метал безперервнолитої заготовки відрізняється більш однорідною та щільною дендритною структурою, а також рівномірним розподілом хімічних елементів, що утворився в результаті дендритної ліквідації.

При дослідженні особливості дендритної структури безперервнолитої заготовки з вуглецевих і низьколегованих сталей різного діаметра показано, що, незважаючи на підвищений вміст вуглецю та марганцю в сталі марки 2 порівняно зі сталлю марки ER 7, параметри дендритної структури в безперервнолитої заготовках діаметром 470 і 450 мм мають практично

однакові значення. Встановлено, що основний вплив на формування дендритної структури в безперервнолитих заготовках діаметром 470 і 450 мм із вуглецевих сталей марки 2 і ER 7 надає режим прискореного охолодження в кристалізаторі та в зоні вторинного охолодження.

Максимально і мінімально допустимий стандартом EN 13262 вміст марганцю та кремнію в межах марки ER 7 не має суттєвого впливу на характеристики дендритних структури. Основним чинником, що впливає на зародження та зростання дендритів, є прискорене охолодження при твердненні безперервнолитих заготовок.

Порівняльний аналіз особливостей дендритної структури безперервнолитих заготовок діаметром 450 мм з вуглецевих сталей марки 2, ER 7 і діаметром 290 мм з низьколегованої сталі 32Г2С, показав, що дендритна структура сталі 32Г2С відрізняється підвищеною кількістю ліквацийних ділянок по всьому перерізу безперервнолитої заготовки в порівнянні з дендритною структурою безперервнолитих заготовок з вуглецевих сталей марки 2 і ER 7. В поверхневих шарах БЛЗ зі сталі 32Г2С розмір дендритних осей зменшився на 30 %, а на відстані $\frac{1}{2}$ радіуса і в центральних шарах заготовки – на 50 % в порівнянні з даними характеристиками для БЛЗ з вуглецевих сталей.

Визначено, що в поверхневих шарах безперервнолитих заготовок із низьколегованих сталей 09Г2С і 32Г2С основний вплив на розмір дендритних параметрів структури надає режим прискореного охолодження, а на відстані $\frac{1}{2}$ радіуса і в центральних шарах хімічний склад – вміст вуглецю і легування сталі марганцем і кремнієм.

Література

1. Рутес В. С., Акімова Е. И., Філімонова Е. В. Метод определения скорости кристаллизации непрерывнолитой заготовки по дендритной структуре // Бюллетень ЦНИИТЭИЧМ. – 1969. – № 16. – С. 51 – 53.
2. Колосов М.И., Строганов А.И., Смирнов Ю.Д. Качество слитка спокойной стали. – М.: Металлургия, 1973. – 408 с.
3. Левченко Г.В., Дёмина Е.Г., Тимофеев Г.В. Влияние содержания углерода на характеристики дендритной структуры непрерывнолитых заготовок из стали 09Г2С // Металлознавство та обробка металів. – 2012. – № 2. – С. 20 – 27.

Одержано 19.03.15

А. И. Бабаченко, Е. Г. Дёмина, А. В. Кныш, Е. А. Шпак

Влияние режима охлаждения и химического состава на формирование дендритной структуры слитка и непрерывнолитых заготовок

Резюме

Исследованы особенности строения дендритной структуры слитка и непрерывнолитых заготовок из углеродистых и низколегированных сталей различного

диаметра. Установлено, що при кристаллизации непрерывнолитых заготовок химический состав стали наряду с ускоренным охлаждением является один из главных факторов, определяющих параметры дендритной структуры.

A. I. Babachenko, K. G. Domina, A. V. Knysh, E. A. Shpak

The influence of the cooling regime and chemical composition on dendritic structure formation of the ingot and continuous cast billets

Summary

The dendritic structure features of the ingot and continuous cast billets of various diameters made of carbon and low-alloyed steels have been investigated. It has been established that at the solidification of continuous cast billets the chemical composition along with high-speed cooling is one of the important factors determining the dendritic structure parameters.

УДК 621.74:669.715:542.65//532.74

Особливості зміни морфології структури первинної фази при кристалізації алюмінієвих сплавів

A. M. Недужий

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

Визначено теплові умови формування дендритних, дендритно-розеткоподібних, розеткоподібно-дендритних, розеткоподібних та глобулярних структур первинної фази для алюмінієвих сплавів типу АК7. Встановлено можливість та особливості переходу дендритної морфології структури α -фази в недендритну і, зокрема, в розеткоподібну.

Залежно від умов заливки, охолодження та кристалізації сплаву лита структура первинної фази в ливарних алюмінієвих сплавах типу АК7 утворюється зазвичай у вигляді трьох типів морфології – традиційної дендритної та недендритних – розеткоподібною та глобулярною [1 – 3]. Разом із цим часто при розгляді мікроструктур вказаних сплавів спостерігається така морфологія первинної фази, яку складно віднести тільки до одного із вище вказаних трьох типів. Така структура може мати риси одночасно двох різних модифікацій, наприклад, дендритної і розеткоподібною або вона є наче перехідною чи проміжною морфологією від одного типу структури первинної фази в інший. Це може бути наслідком різкої зміни умов кристалізації сплаву. Оскільки в літературі мало інформації про можливість