

Вплив вуглецю на особливості перитектичної кристалізації та дендритну структуру безперервнолитих заготовок зі сталі 09Г2С

Г. В. Левченко, доктор технічних наук, професор

К. Г. Дьоміна, кандидат технічних наук

Г. В. Тимофієв

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

Досліджено вплив вмісту вуглецю на особливості механізму перитектичної кристалізації та характеристики дендритної структури безперервнолитих заготовок зі сталі 09Г2С. Встановлено, що при вмісті вуглецю 0,09 – 0,11 % та марганцю 1,5 – 1,7 % у сталі 09Г2С схильність до утворення дефектів кристалізаційного походження знижується.

Відомо, що хімічний склад сталі є одним з факторів, що визначають схильність сталі до утворення «гарячих» (кристалізаційних) тріщин [1]. Сталі, що містять 0,10 – 0,20 % (по масі) вуглецю, затвердівають у результаті перитектичної кристалізації. Вони є найбільш чутливими до утворення даного виду дефектів [2]. Дослідження особливостей фазових перетворень, що відбуваються під час перитектичного перетворення, і регулювання хімічного складу для зниження схильності до утворення дефектів кристалізаційного походження набуває особливої важливості у зв'язку з постійним розширенням виробництва заготовок методом безперервного лиття.

Тому мета даної роботи полягала в оцінюванні впливу вмісту вуглецю в сталі 09Г2С на особливості механізму перитектичної кристалізації, характеристики дендритної структури й схильність до утворення дефектів кристалізаційного походження.

Матеріалом дослідження були зразки п'яти темплетів безперервнолитих заготовок (БЛЗ) 335 x 400 мм, що відрізняються, в основному, вмістом вуглецю (табл. 1), виробництва ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат ім. Ф. Є. Дзержинського».

Зразки для металографічного аналізу відбирали від поверхневих шарів, на відстані j товщини 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 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) [3].

Згідно з діаграмою стану Fe-C низьколегована сталь 09Г2С відповідає первинноферитній (до 0,10 % C) та доперитектичній (0,10 – 0,16 % C) фазовим областям кристалізації (рис. 1 а). Однак сталь 09Г2С, крім вуглецю, містить марганець і кремній, які впливають на фазовий склад та механізм кристалізації сталі.

Фазові перетворення

Таблиця 1

Хімічний склад досліджених плавок сталі 09Г2С

Темплет	Вміст елементів, % по масі								
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Al
1	0,068	1,44	0,55	0,026	0,031	-	-	-	0,010
2	0,090	1,43	0,55	0,022	0,023	0,020	0,020	0,030	0,028
3	0,090	1,54	0,56	0,02	0,020	0,010	0,010	0,020	0,010
4	0,100	1,39	0,55	0,03	0,024	0,030	0,040	0,005	0,018
5	0,110	1,50	0,58	0,026	0,035	0,027	0,012	0,017	0,010
Вимоги ГОСТ 19281	0,06-0,12	1,30-1,70	0,50-0,80	≤0,040	≤0,035	≤0,30	≤0,30	≤0,30	-

У роботах [4 – 7] розглянуто вплив основних елементів (вуглецю, марганцю й кремнію) на механізм кристалізації сталей з вмістом вуглецю у діапазоні 0,05 – 0,70 % С. Показано, що кремній не змінює механізм кристалізації сталі, отже, і положення сплаву в первинноферитній і перитектичній фазових областях на діаграмі Fe-Mn-Si-C [6]. Його вплив для доперитектичних сталей (0,10 – 0,16 % С) обмежується тільки збільшенням частки аустеніту, що утворився в результаті високотемпературного поліморфного $\delta \rightarrow \gamma$ перетворення. Протилежний вплив на механізм кристалізації має марганець, варіацією вмісту якого можна змінити тип кристалізації, наприклад, з первинноферитної на доперитектичну, з доперитектичної на заперитектичну, а також на співвідношення фаз, що беруть участь у перитектичній реакції. Однак, його вплив у первинноферитній області кристалізації в 17 раз слабший, ніж вплив вуглецю [8].

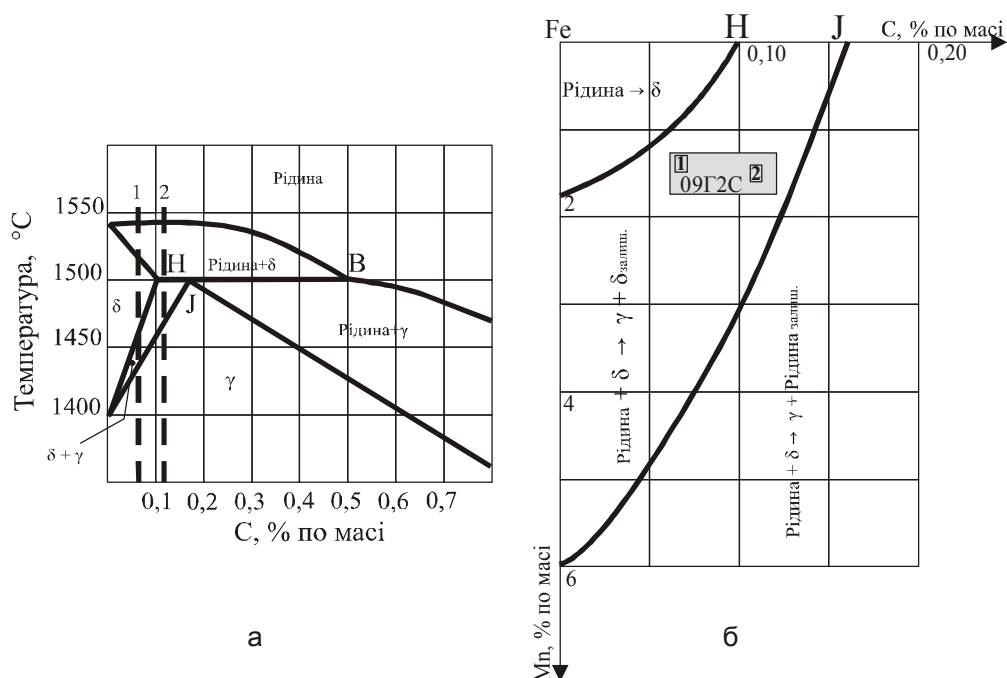
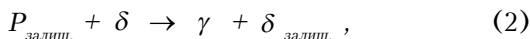
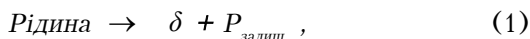


Рис. 1. Політермічний розріз частини діаграми стану Fe-C (а) та ізотермічний розріз поверхні первинноферитної і доперитектичної фазових областей кристалізації на діаграмі Fe-Mn-C (б). 1 – 0,068 % С, 2 – 0,11 % С.

Фазові перетворення

Встановлено, що низьколегована сталь 09Г2С навіть при мінімальному вмісті вуглецю й марганцю знаходиться в області доперитектичної кристалізації (рис. 1 б). Її твердіння з утворенням аустенітної структури здійснюється згідно реакцій:



Останньою стадією формування аустенітної структури є високотемпературне поліморфне $\delta \rightarrow \gamma$ перетворення, яке супроводжується різким зменшенням об'єму та викликає збільшення усадки додатково до усадки твердіння. Таким чином, створюються сприятливі умови для утворення тріщин. Тому, зменшуючи кількість δ -фериту, можна понизити кількість аустеніту, що утворився в результаті поліморфного перетворення (3). І, навпаки, зі збільшенням кількості залишкової рідини підвищується кількість перитектичного аустеніту (2).

Мікроструктура безперервнолитих заготовок 335 x 400 мм двох плавок сталі 09Г2С з різним вмістом вуглецю представлена на рис. 2. Травління пікратом натрію дозволило виявити хімічну мікронеоднорідність кремнію й марганцю, яка утворилась в результаті дендритної ліквідації й повністю збереглася при охолодженні безперервнолитої заготовки до температури навколишнього середовища. Зміни дендритної структури по перетину безперервнолитих заготовок мають загальні тенденції, які повністю відображають відомі уявлення про формування структури сталевого зливка [9]. У поверхневих шарах, де при твердінні утворюються найдрібніші кристали, ліквідаційні смуги й смуги без ліквідації мають найменші розміри. У напрямку від поверхні до центральних шарів розміри дендритних осей і міждендритних просторів збільшуються, тобто чітко прослідковується перехід від поверхневої зони дрібних кристалів до зони стовпчастих кристалів і до центральної зони рівноосних кристалів.

Металографічний аналіз плавок сталі 09Г2С з мінімальним і максимальним вмістом вуглецю показав (табл. 2), що підвищення вмісту вуглецю на 0,04 % практично не вплинуло на розміри дендритних осей і міждендритних просторів у поверхневих шарах (переважаючий вплив на формування дендритної структури справляє фактор

Таблиця 2

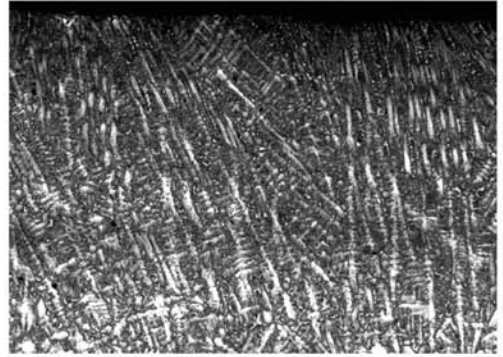
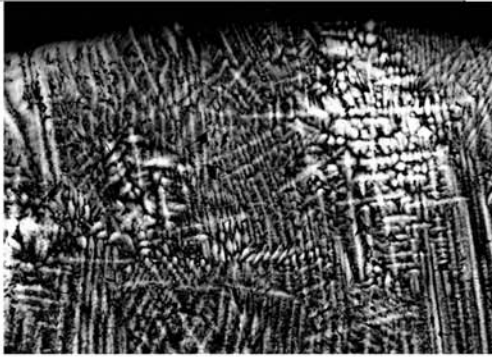
Результати металографічного аналізу БЛЗ 335 x 400 мм зі сталі 09Г2С

Місце дослідження	Об'ємна частка ділянок, %		Середній розмір, мкм		Щільність дендритної структури в об'ємі сплаву, 1/мм ²	
	Міждендритні простори	Дендритні осі	Міждендритні простори	Дендритні осі		
1*	Поверхня	24	76	25,6	72,4	260
	¼ товщини	25	75	53,9	170,4	50
	Центр	26,5	73,5	61,2	230,9	30
2*	Поверхня	25	75	30,7	74,9	230
	¼ товщини	28	72	60	117,1	80
	Центр	36	64	70,3	144,2	50

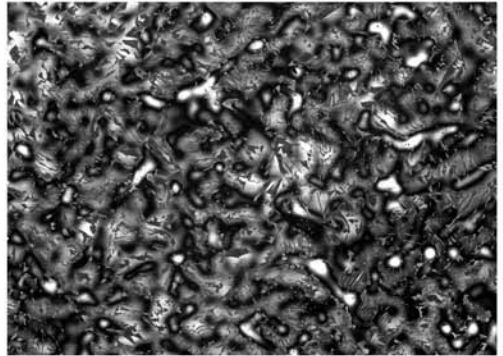
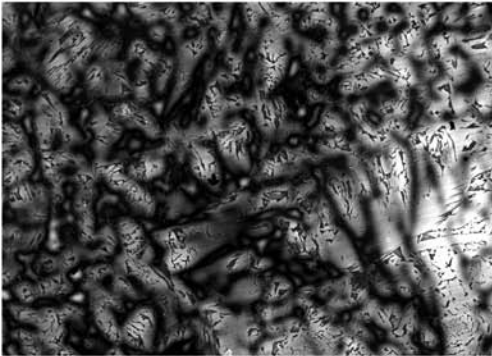
* 1 – характеристики дендритної структури при вмісті вуглецю 0,068 %, 2 – середні арифметичні значення характеристик дендритної структури чотирьох плавок (0,09 – 0,11 % С)

Фазові перетворення

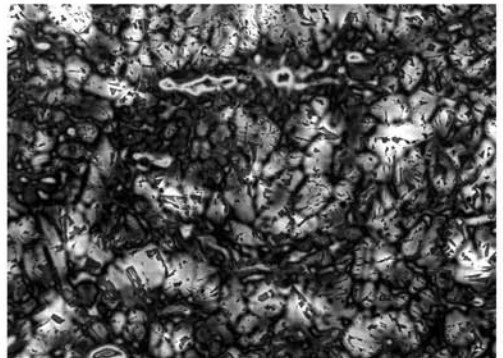
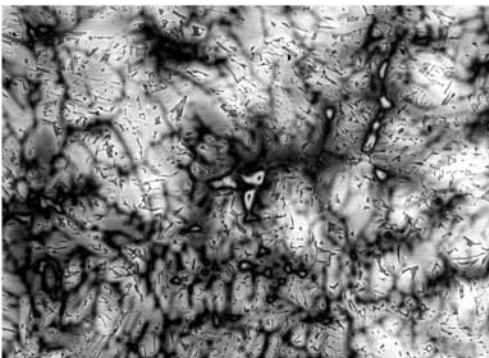
Поверхня



1/4 товщини



Центр



а

б

Рис. 2. Зміна дендритної структури за перерізом БЛЗ 335 x 400 мм зі сталі 09Г2С. а – 0,068 % С, б – 0,11 % С. x 30.

інтенсивного тепловідведення). Однак в напрямку від поверхні до центру заготовок вже на відстані $\frac{1}{4}$ товщини середній розмір дендритних осей зменшується в 1,45 рази і в 1,60 рази в центральних шарах. При цьому щільність дендритної структури на відстані $\frac{1}{4}$ товщини й у центральних шарах збільшується в 1,70 рази.

Фазові перетворення

Об'ємна частка дендритних осей і міждендритних просторів у зразках аналізованих плавов у поверхневих шарах і на відстані j товщини заготовки змінюється не суттєво (табл. 2). Але в центральних шарах з підвищенням вмісту вуглецю на 0,04 % об'ємна частка міждендритних просторів збільшується на 10,0 %. Саме міждендритні простори, збагачені легуючими й домішковими елементами, є місцями зосередження останніх порцій рідини.

При мінімальному вмісті вуглецю в сталі 09Г2С кількість залишкової рідини в центральних шарах становить близько 25,0 % і є недостатнім для забезпечення рівномірного розподілу за периметром дендритних осей (рис. 3 а). Більше того, залишкова рідина зосереджена в каналах, які перебувають під високими напругами, створеними численними дендритами. В'язкість даної рідини досить велика, що не дає їй можливості швидко пересуватися й «залікувати» мікророзриви, пустоти й пори.

Зі збільшенням вмісту вуглецю й марганцю залишкова рідина, через пряму ліквідацію основних хімічних елементів, збагачена легуючими й домішковими елементами, що сприяє зниженню кінематичної в'язкості Fe-C розплаву [10]. До моменту зрощення кристалічного каркасу рідкий розплав і комірки скелету мають гарне сполучення між собою, і, якщо утворюється мікророзрив, то залишкова рідина здатна швидко його заповнити, тобто «залікувати». Тому, підвищенням вмісту вуглецю в сталі 09Г2С до 0,11 % можна досягти деякого зниження кінематичної в'язкості рідини. При цьому кількість залишкової рідини збільшується до 36,0 %, що забезпечує її рівномірний розподіл за периметром дендритних осей (рис. 3 б). Цей факт узгоджується з даними, отриманими в роботі [6], у якій встановлено, що при вмісті залишкової рідини більше 35,0 %, чутливість до появи кристалізаційних тріщин знижується.

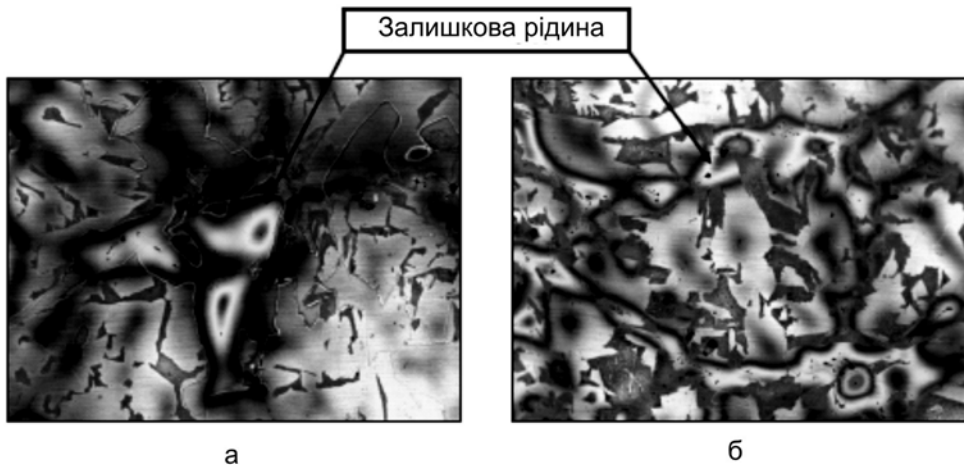


Рис. 3. Розподіл залишкової рідини в мікроструктурі сталі 09Г2С в центральних шарах БЛЗ 335 x 400 мм. а – 0,068 % С, б – 0,11 % С. x 100.

Для порівнювальної оцінки тріщиностійкості плавов сталі 09Г2С з різним вмістом вуглецю скористалися теорією Сміта. Згідно з цією теорією критерій тріщиностійкості τ залежить від кута змочування θ (рис. 4), який утворюють залишкова рідина й поверхня дендритної осі, від кількості рідини й твердої фази в ефективному інтервалі кристалізації й від співвідношення їх поверхневих енергій [11, 12].

Критерій тріщиностійкості визначається за формулою (4) і характеризує розподіл рідини в об'ємі сплаву, а саме, чи утворює залишкова рідина безперервні плівки навколо дендритів або зосереджена окремими краплинами:

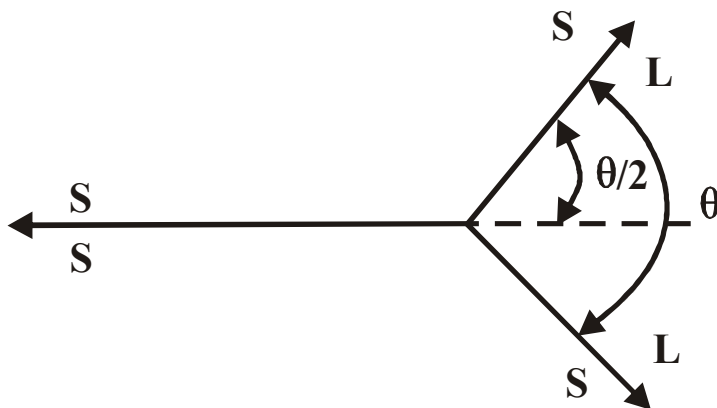


Рис. 4. Схема формування кута змочування θ на межі розділу твердої та рідкої фаз [11].

$$\tau = \gamma_{LS} / \gamma_{SS} = \frac{1}{2} \cos(\theta/2), \quad (4)$$

де γ_{LS} – питома поверхнева енергія розділу твердої й рідкої фаз; γ_{SS} – питома поверхнева енергія границь твердої фази; θ – двогранний кут змочування, $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$.

При мінімальному вмісті вуглецю в сталі 09Г2С залишкової рідини мало ($< 30\%$), вона розподілена окремими краплинами або плівками (рис. 3 а). Кут змочування перебуває в межах $0^\circ < \theta < 90^\circ$, тому $1 < \tau \rightarrow \infty$ – тріщиностійкість знижується. При максимальному вмісті вуглецю в сталі 09Г2С кількість залишкової рідини збільшується (табл. 2), ліквацийні процеси в ній розвинені сильніше, вона утворює майже безперервні плівки навколо дендритів (рис. 3 б). Кут змочування перебуває в межах $120^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$, а $0,5 \leq \tau \leq 1$ – тріщиностійкість у цих сталях підвищується.

Результати металографічного аналізу показали, що підвищення вмісту вуглецю в межах марочного складу сталі 09Г2С при легуванні марганцем $\sim 1,50\%$ не змінює механізм доперитектичної кристалізації, але збільшує кількість залишкової рідини аустеніту, що утворювався з неї. Це до деякої міри знижує чутливість безперервнолитого металу до утворення дефектів кристалізаційного походження.

Ця закономірність чітко прослідковується при детальному дослідженні зразків, вирізаних з поверхневих шарів БЛЗ. Травлення зразків БЛЗ у гарячому розчині пікрата натрію наочно показує всі фазові перетворення, що відбуваються у даній сталі в інтервалі температур, починаючи від ефективного інтервалу кристалізації й закінчуючи температурою навколишнього середовища: утворення при кристалізації дендритів δ -фериту, потім у результаті високотемпературного поліморфного δ - $\Phi \rightarrow \gamma$ перетворення – аустеніту, при подальшому охолодженні утворення доєвтектоїдного фериту й розпад аустеніту на ферито-карбідну суміш (перліт).

У мікроструктурі поверхневих шарів БЛЗ зі сталі 09Г2С з мінімальним вмістом вуглецю $0,068\%$ кількість дендритів δ -ферита, що відрізняються від аустенітних дендритів пластівчастою формою, становить порядку $40,0\%$ (рис. 2). Розподіл основних легуючих елементів (кремнію й марганцю) відповідає прямій ліквации: концентрація легуючого елемента збільшується від центру до периферії дендритних осей і досягає максимального значення у міждендритних просторах [13]. При

Фазові перетворення

подальшому охолодженні утворення перліту відбувається переважно в «колишніх» міждендритних просторах (рис. 5 а). Дані ділянки аустеніту збагачені не тільки кремнієм, але й марганцем, який збільшує стійкість переохолодженого аустеніту в інтервалі температур двофазної ($\gamma + \alpha$) і перлітної областей. У результаті розпад переохолодженого аустеніту на ферито-карбідну суміш у мікрооб'ємах з підвищеним вмістом марганцю відбувається в останню чергу.

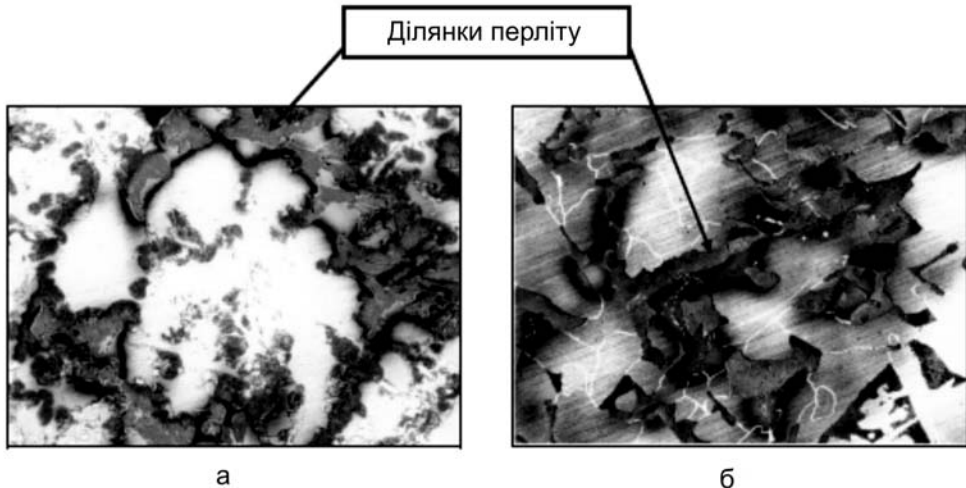


Рис. 5. Мікроструктура сталі 09Г2С в поверхневих шарах БЛЗ. а – 0,068 % С, б – 0,11 % С. х 300.

При збільшенні вмісту вуглецю в межах марочного складу до 0,11 % кількість дендритів δ -фериту у поверхневих шарах зменшується до 20,0 % (рис. 2). В результаті стає менше об'ємна частка аустеніту, що утворювався по реакції (3). На рис. 5 б показано, що розпад аустеніту на ферито-карбідну суміш відбувається вже не в міждендритних просторах, а, в основному, по периферії дендритних осей. Це свідчить про те, що ділянки між дендритами при кристалізації збагачувалися кремнієм (дендритна ліквация), а найбільший вміст марганцю спостерігається на периферії дендритних осей (внутрішньокристалічна ліквация), тобто аналізовані дендрити є аустенітними. Даний розподіл ділянок перліту є непрямим підтвердженням, що на останній стадії твердіння сталі 09Г2С збільшується кількість аустеніту, що утворювався при кристалізації із залишкової рідини $P_{\text{зал}} \rightarrow \gamma$. Це, як було відзначено вище, сприяє зниженню чутливості литого металу до утворення кристалізаційних тріщин.

Таким чином, для марки сталі 09Г2С вміст вуглецю в межах 0,09 – 0,11 % і марганцю більше 1,5 % при перитектичній кристалізації буде сприяти збільшенню кількості залишкової рідини та зменшенню частки δ -фериту, отже, і деякому зниженню схильності до утворення дефектів кристалізаційного походження.

Література

1. Лапотышкин Н. М., Лейтес А. В. Трещины в стальных слитках. – М.: Металлургия, 1969. – 112 с.
2. Рыжиков А. А. Теоретические основы литейного производства. – М.: Машгиз, 1961. – 446 с.
3. Ругес В. С., Акимова Е. И., Филимонова Е. В. Метод определения скорости кристаллизации непрерывнолитой заготовки по дендритной структуре. // Бюллетень ЦНИИТЭИЧМ. – 1969. – № 16. – С. 51 – 53.

4. Яценко А. И., Левченко Г. В., Решина Н. И. Фазовые превращения и ликвация в низкоуглеродистых конструкционных сталях. // *Фундаментальные и прикладные проблемы чёрной металлургии*. – Киев: Наук. думка, 1995. – С. 191 – 200.
5. Левченко Г. В., Яценко А. И., Дёмина Е. Г. Формирование аустенита в железоуглеродистых сплавах перитектического типа. // *Фундаментальные и прикладные проблемы чёрной металлургии*. – Днепропетровск: «Візіон». – 2004. – Вып. № 7. – С. 165 – 169.
6. Дёмина Е. Г., Левченко Г. В., Яценко А. И. Перитектическая кристаллизация и качество стальных отливок. // *Фундаментальные и прикладные проблемы чёрной металлургии*. – Днепропетровск: «Візіон». – 2004. – Вып. № 8. – С. 313 – 319.
7. Дёмина Е. Г., Левченко Г. В., Грицай Т. В. Влияние углерода, кремния и марганца на морфологию дендритной структуры конструкционных сталей перитектического типа. // *Фундаментальные и прикладные проблемы чёрной металлургии*. – Днепропетровск: «Візіон». – 2005. – Вып. № 10. – С. 213 – 231.
8. Jobe M. On the equilibrium diagram of ternary alloy system of iron, manganese and carbon // *Science reports of the research institutes Tohoku university*. – 1951. – 3, № 5. – P. 540 – 621.
9. Колосов М. И., Строганов А. И., Смирнов Ю. Д. Качество слитка спокойной стали. – М.: Металлургия, 1973. – 408 с.
10. Арсеньев П. П., Рыжонков Д. И., Анинкин Ю.А. Вязкостная активность легирующих элементов в жидком железе и Fe-C расплавах. // *Исследование процессов с участием окисных и металлических расплавов*. – М.: Металлургия, 1983. – С. 120 – 127.
11. Smith C. S. Grains, phases and interfaces: an interpretation of microstructure. // *Trans. Am. Inst. Mining Metall. Eng.* – 1948. – 175. – P. 15 – 51.
12. Shankar V., Gill T. P. S., Mannan S. L. Solidification cracking in austenitic stainless steel welds. // *Sadhana*. – 2003. – 28. – Part 3 – 4. – P. 359 – 382.
13. Яценко А. И., Грушко П. Д. Кристаллизация и первичная структура сталей, легированных кремнием и марганцем. // *Металлы*. – 1991. – № 4. – С. 130 – 135.

Одержано 24.04.12

Г. В. Левченко, Е. Г. Дёмина, Г. В. Тимофеев

Влияние углерода на особенности перитектической кристаллизации и дендритной структуры непрерывнолитых заготовок из стали 09Г2С

Резюме

Исследовано влияние содержания углерода на особенности механизма перитектической кристаллизации и характеристики дендритной структуры непрерывнолитых заготовок из стали 09Г2С. Установлено, что при содержании углерода 0,09 – 0,11 % и марганца 1,5 – 1,7 % в стали 09Г2С предрасположенность к образованию дефектов кристаллизационного происхождения снижается.

G. V. Levchenko, K. G. D'omina, G. V. Timofeev

Influence of carbon content on features of the mechanism peritectic crystallisation and the dendritic structure characteristics of continuous cast billets of 09Г2С steel

Summary

The influence of carbon content on features of the peritectic crystallization mechanism and dendritic structure characteristics of continuous cast billets of 09Г2С steel has been investigated. It has been established that the probability formation of crystallization defects decreases in 09Г2С steel at carbon content of 0.09 – 0.11 % and manganese content of 1.5 – 1.7 %.