

УДК 669.13: 669.111.2

Іванов Валерій Григорович, доцент, кандидат технічних наук

РОЛЬ КИСНЮ ПРИ ФОРМОУТВОРЕННІ ГРАФІТУ В ЧАВУНАХ

Запорізький національний технічний університет

Досліджено вплив кисню на формоутворення графіту в чавунах. Встановлено, що незначна кількість кисню, яка є присутньою у чавунах (0,002...0,003 %) сприяє створенню оксидів зниженої валентності (субоксидів, наприклад, магнію, кремнію, заліза та інших елементів), що приймають активну участь у формуванні вкраплень графіту різної морфології. Так, утворення поверхнево-активного субоксиду кремнію під час взаємодії кремнію з монооксидом вуглецю у рідкому чавуні відповідає за морфологічні особливості графітових вкраплень пластинчастої форми. У високоміцних чавунах морфологія кулястих вкраплень графіту також зумовлюється інтенсивністю протікання реакції магнію з монооксидом вуглецю й утворенням субоксиду магнію.

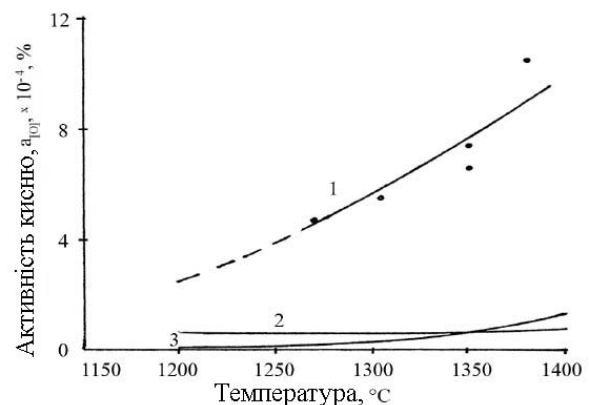
Ключові слова: чавун, кисень, морфологія, вкраплення графіту, субоксиди

Вступ. Технічні чавуни завжди містять домішки різних елементів, які можуть суттєво впливати на формоутворення графітової фази. Тому вміст таких домішок потрібно контролювати для отримання необхідної морфології графіту. У вітчизняній практиці чавуноливарного виробництва майже не звертають уваги на контроль газів, серед яких особливу зацікавленість уявляє кисень, дія якого аналогічна впливу іншого шкідливого елементу – сірки. Вважається навіть, що його надлишкова кількість, як і сірки, призводить до утворення пластинчатого графіту, а рафінування від кисню сприяє утворенню кулястих вкраплень у чавунах. Тому вивчення ролі кисню на формоутворення графіту залишається актуальною задачею, вирішення якої створить умови для впровадження оптимальних технологічних процесів виготовлення чавунних виливків із бажаною морфологією графітної фази.

Огляд літератури. За літературними даними роль кисню у чавунах оцінюється дуже суперечливо. Кисень може бути як у розчиненому стані, так і входити до складу неметалевих сполук. Так, з одного боку, високий вміст розкислювачів – вуглецю, кремнію, марганцю – створює дефіцит кисню у чавунах, а з другого боку, як наполягають у багатьох роботах [1-4], що саме рафінування від надлишкового кисню створює умови для суттєвого змінювання морфології графітної фази у чавунах. В інших дослідженнях вплив кисню на зародження графіту взагалі не виявлено [5,6].

Як відомо, активність кисню залежить від температури рідкого чавуну. Рис. 1 добре ілюструє різницю між фактичною та рівноважною активностями кисню у сірих чавунах [7]. Також залежно від умов плавки, хімічного складу та шихтових матеріалів вміст кисню також суттєво

відрізняється від рівноважного. Наприклад, за додаванням магнію у рідкий чавун відбувається не тільки інтенсивне розкислення, що супроводжується утворенням газових бульбашок, а і змінювання морфології графіту. Так, у роботі [8] підтверджується, що газові бульбашки відіграють значну роль у зародженні та зростанні кулястого графіту. Одночасно, дія магнію й утворення кулястого графіту розглядається, як результат усунення негативного впливу сірки та кисню.



1 - фактична у ковші; 2 - рівноважна за реакцією $[C] + [O] = \{CO\}$;
3 - рівноважна за реакцією $[Si] + 2[O] = \{SiO_2\}$
Рисунок 1 – Активність кисню у сірих чавунах [7]:

Також висувається гіпотеза [9,10], що формоутворення графітових вкраплень у чавунах пов'язано з утворенням нанокристалів графіту та кількістю розчиненого та адсорбованого кисню. Вважається, що модифікування розплаву сірого чавуну феросилієм сприяє зниженню концентрації адсорбованого кисню та збагаченню розплаву центрами кристалізації дендритів графіту. Спочатку розчинений у рідкому чавуні кисень дифундує у безструктурні зони розплаву, а потім адсорбується на центрах кристалізації дендритів аустеніту та графіту. Присутність у феросиліції алюмінію та кальцію сприяє зни-

женню адсорбованого кисню та сірки і створює умови для зростання розгалужених пластин графіту [9]. Ще більше знижується концентрація адсорбованого кисню та розгалуженість вкрапель графіту, аж до утворення їх у вигляді куль, за модифікуванням магнієм. Магній майже не розчинюється у рідкому чавуні, знаходиться у атомарному газоподібному стані та має максимальну термодинамічну активність. На відміну від кремнію та алюмінію, що знаходяться у розчиненому стані, магній є більш сильнішим розкислювачем, має низьку температуру кипіння, що сприяє барботажу рідкої ванни та значно підвищує кінетику процесу розкислення чавуну і зменшує концентрації кисню у розплаві [10]. Встановлено [11], що для утворення кулястого графіту необхідно щоб концентрація розчиненого кисню у розплаві чавуну складала не більше 0,0016...0,0018 % за остаточною вмістом магнію 0,04 % [11].

Як відомо [12], розчинність кисню залежить від вмісту вуглецю та кремнію

$$\lg[\% O] = -\frac{2975}{T} - 1,06 - \lg[\% C] + 0,19[\% C] - 0,51\lg[\% Si] \quad (1)$$

Одночасно, в заевтектичних чавунах вміст кисню у чавуні збільшується за рахунок адсорбції, а також знаходження кисню у вигляді міцних сполук, де кремній відіграє найбільшу роль (SiO_2 , SiO та більш складні сполуки) [12].

Окрім того, методика вимірювання вмісту кисню у чавунах також впливає на величину цих показників. Це пов'язано з тим, що під час вимірювання хімічним або фізичним методом у газовій фазі фіксується тільки кисень, що входить до CO та CO_2 . А відомо, що у газовій фазі можуть міститися інші субоксиди AlO , SiO та інші леткі, які будуть конденсуватися за 1300...900 °C та також збільшувати загальний вміст кисню. Тому точнішим буде застосування методу вакуум-плавлення безпосередньо у зоні плавильного простору із залученням мас-спектрометричного аналізу за температури вище 1300 °C [13]. Але такий метод значно ускладнює процес контролю та не може бути застосованим під час експрес-аналізів у ливарних цехах.

Утворенню субоксидів за високої температури у рідкому чавуні в науковій літературі майже не приділяють уваги, і не зважають на те, що вони суттєво впливають на морфологію графіту [14,15]. Використання петрографічного методу аналізу дозволить відрізнити оксиди від субоксидів або фаз нестехіометричного складу, відомості про які необхідні для розкриття меха-

нізму їх утворення. Також цей метод надає можливість досліджувати вкраплення графіту не тільки на шліфі у відбивному світлі, але і в прохідному – після екстрагування вкрапель з поверхні шліфа та відстежити трансформацію вкрапель графіту, їх морфологію на всіх етапах виробництва чавуну.

Постановка задачі. Дослідити вплив субоксидних сполук, що виявляються у чавунах на морфологію графітової фази.

Для цього необхідно було вирішити наступні задачі:

- визначити вміст кисню та інших газів у чавунах з різною формою вкрапель графіту;
- визначити роль субоксидів кремнію, алюмінію, магнію та інших елементів на формоутворення графіту.

Матеріали і методи. Для дослідження використовували синтетичні чавуни з різною морфологією графіту (табл. 1). Як шихтові матеріали використовували спеціально підготовлені металеві брикети у вигляді циліндрів діаметром 30 мм та висотою 20 мм. Такі брикети одержували на пресі ПГ-100 з 95 % порошку заліза (ПЖР 3.200.28, ГОСТ 9849-86) та 5 % малозольного графіту без в'язучого матеріалу. Для доведення складу чавуну за кремнієм використовували кристалічний кремній (Кр1, ГОСТ 2169-69). Для одержання кулястого графіту використовували нікель-магнієву лігатуру (15 % магнію), що попередньо виготовляли з електролітичного нікелю (Н-1, ГОСТ 849-97) та первинного магнію (Мг 95, ГОСТ 804-93).

Таблиця 1 – Хімічний склад дослідних чавунів

Вид чавуну	Хімічний склад, масова частка, %				
	Вуглець	кремній	марганець	сірка	фосфор
Білий чавун	4,60	0,05	0,050	0,020	0,012
Сірий чавун	4,60	1,50	0,045	0,020	0,012
Високоміцний чавун	4,59	2,50	0,042	0,005	0,012

Застосовували металографічний, мікрорентгеноспектральний та петрографічний методи аналізу дослідних чавунів. Металографічний аналіз здійснювали за допомогою оптичних мікроскопів МІМ-8М та Zeiss Axiovert 200 MAT. Петрографічні дослідження виконували у відбивному світлі на мікроскопі МБІ-6 та прохідному світлі на кристалооптичному мікроскопі МІН-8 з використанням стандартних наборів імерсійних рідин. Мікрорентгеноспектральний аналіз чавунів проводили на електронному растровому мікроскопі SUPRA 40 WDS (Carl Zeiss). Газонаси-

ченість сплавів вимірювали методом відновлювального плавлення у атмосфері інертного газу за допомогою газоаналізаторів LECO.

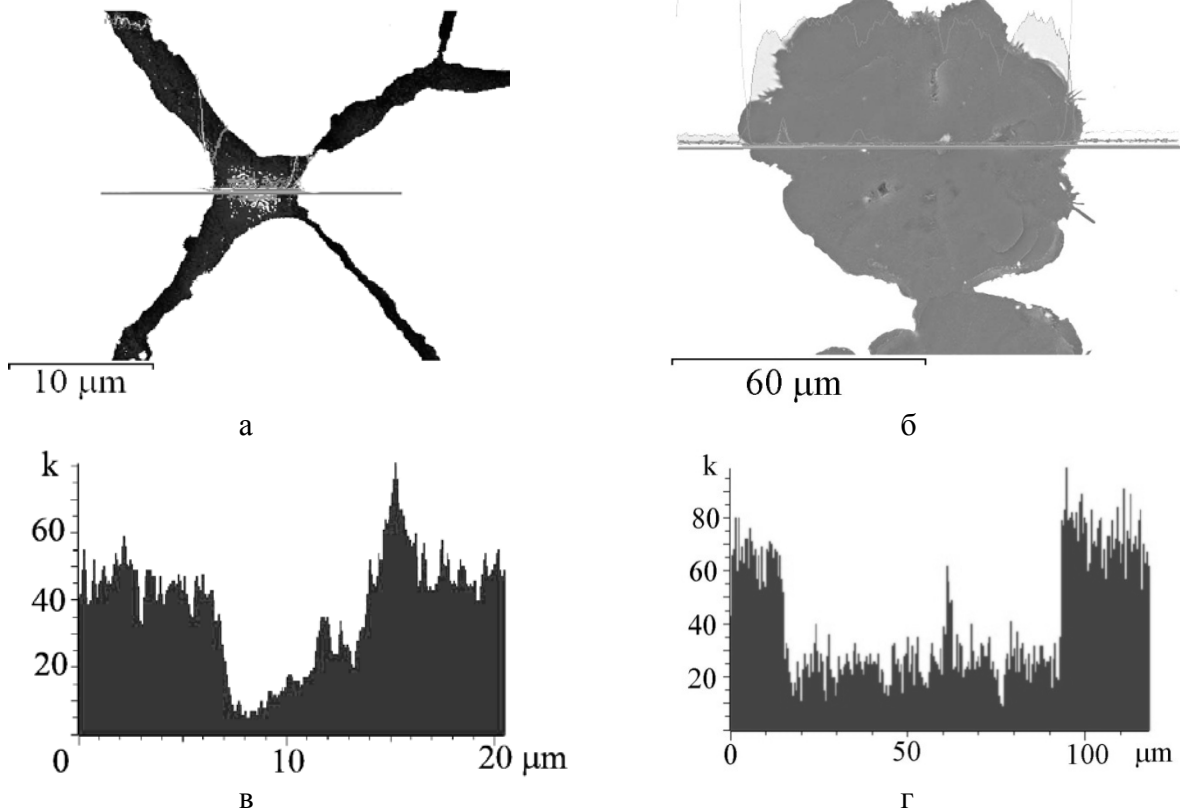
Експерименти. Плавку здійснювали у відкритій індукційній печі зі спеціально виготовленим графітовим осердям в алундовому тиглі діаметром 35 мм та висотою 100 мм. Після розплавлення шихти і досягнення металом температури 1450 °С до нього фракційно додавали кристалічний кремній та нікель-магнієву лігатуру. Розмір фракції додавання складав 0,5...1,0 мм. Після засвоєння кожного додавання відбирали порцію металу за допомогою кварцових трубок діаметром 5 мм. Потім з відібраного металу виготовляли проби для газового аналізу та шліфи для металографічних та рентгеноспектральних досліджень.

Результати. Вміст кисню у дослідних чавунах наведено у табл. 2.

Таблиця 2 – Вміст кисню у дослідних чавунах

Тип чавуну	Вміст кисню,		
	одиниці ppm	мас. частка, %	см ³ на 100 г металу
Білий чавун	60	0,006	4,2
Сірий чавун	30	0,003	2,1
Високоміцний чавун	20	0,002	1,4

Для з'ясування переважного розподілу кисню між металевою основою та графітовою фазою виконували також мікрорентгеноспектральний аналіз сірого та високоміцного чавунів (рис. 2 і 3). У табл. 3 і 4 наведено дані з локального аналізу чавунів.



а, б - вкраплення графіту та лінія сканування сірого та високоміцного чавунів відповідно; в, г - розподіл кисню у сірому та високоміцному чавуні відповідно

Рисунок 2 - Розподіл кисню за структурними складовими у дослідних чавунах

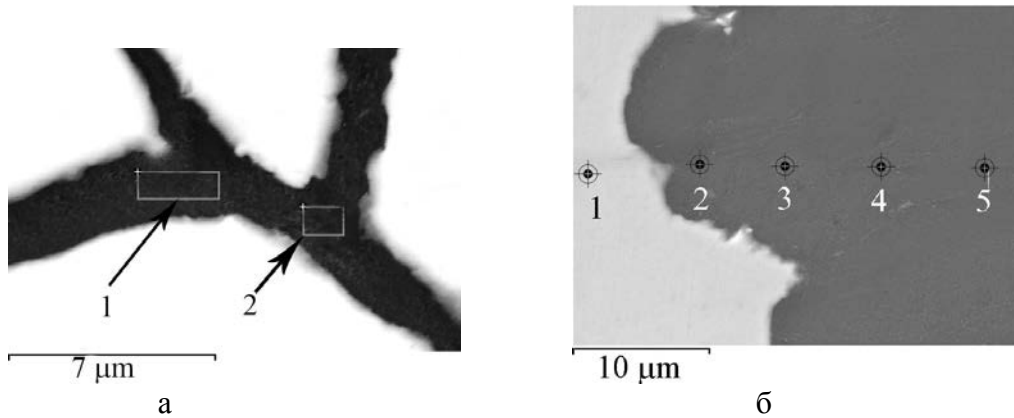


Рисунок 3 – Місця локального мікрорентгеноспектрального аналізу дослідних чавунів: а - у сірому чавуні; б - у високоміщному чавуні

Таблиця 3 – Результати локального мікрорентгеноспектрального аналізу (відповідно рис. 3а)

Місце аналізу	Вміст елементів, масова частка, %						
	<i>C</i>	<i>O</i>	<i>Si</i>	<i>S</i>	<i>Mn</i>	<i>Fe</i>	Всього
1	90,78	3,66	0,11	0,18	0,72	4,55	100,00
2	87,35	6,89	0,06	0,12	-	5,58	100,00

Таблиця 4 – Результати локального мікрорентгеноспектрального аналізу (відповідно рис. 3 б)

Місце аналізу	Вміст елементів, масова частка, %									
	<i>C</i>	<i>O</i>	<i>Mg</i>	<i>Al</i>	<i>Si</i>	<i>S</i>	<i>Ca</i>	<i>Fe</i>	<i>Ni</i>	Всього
1	6,87	-	-	0,25	2,03	-	-	89,42	1,42	100,00
2	94,97	3,45	-	-	-	-	-	1,58	-	100,00
3	85,70	0,75	3,61	2,39	0,19	3,88	2,89	0,59	-	100,00
4	95,87	3,31	-	-	-	-	-	0,82	-	100,00
5	95,52	3,41	-	-	-	-	-	1,07	-	100,00

Наявність субоксидів кремнію, магнію та інших елементів пояснює, чому за перерахунком хімічного методу аналізу, дуже часто спостерігають підвищену суму оксидів (більше 100 %). Такий перерахунок виконують на стехіометричні оксиди (SiO_2 , MgO , Al_2O_3 та ін.), і якщо сума

таких оксидів більше 100 % вважають за похибку аналізу.

Тому додатково здійснювали порівняльний мікрорентгеноспектральний аналіз порошку оксиду магнію стехіометричного складу (рис. 4).

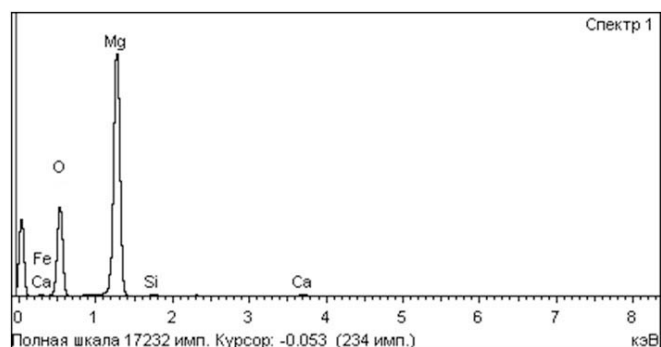
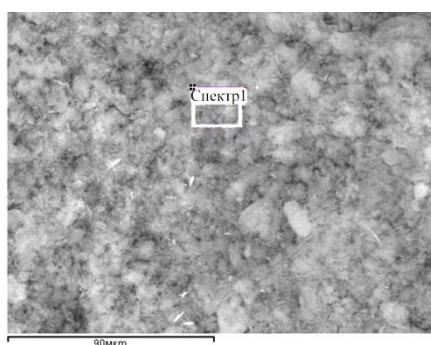


Рисунок 4 – Місце аналізу порошку оксиду магнію (а) та спектральна крива розподілу елементів (б)

Обговорення. Як видно з табл. 2, вміст кисню у чавунах суттєво зменшується під час додавання сильних розкислювачів – кремнію та магнію. Як і слід було очікувати, найменший вміст кисню спостерігали у чавунах з кулястим графі-

том (0,002 %). Але слід відзначити, що різниця між вмістом кисню у сірому чавуні була досить незначною (0,003 %), на відміну від білого чавуну (0,006 %).

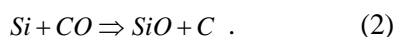
Таким чином підтверджується, що між вмістом газів (особливо киснем) і формою вкраплень графіту існує взаємозв'язок. Одночасно, проявляється загальна тенденція зменшення кількості газів за збільшенням компактності вкраплень графіту.

Таблиця 5 – Результати локального мікрорентгеноспектрального аналізу (відповідно рис. 4а)

Елемент	Ваговий, %	Атомний, %	Сполука, %	Формула сполуки
<i>Mg</i>	58,90	49,14	97,66	<i>MgO</i>
<i>Si</i>	0,30	0,22	0,65	<i>SiO₂</i>
<i>Ca</i>	0,51	0,26	0,71	<i>CaO</i>
<i>Fe</i>	0,76	0,28	0,98	<i>FeO</i>
<i>O</i>	39,53	50,11	-	-
Всього	100,00	-	-	-

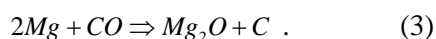
Додатково виконані точкові мікрорентгеноспектральні дослідження встановили, що локальний вміст кисню може бути суттєво більший. Наприклад, для сірих чавунів у графітових вкрапленнях спостерігали підвищений вміст кисню, що досягав майже 7 % (див. рис. 3 а та табл. 3). У високоміцних чавунах локальний вміст кисню у кулястих вкрапленнях графіту був у два рази меншим – 3,45 % (див. табл. 4).

На наш погляд це пояснюється тим, що за високої температури (1300...1360 °С) кремній у сірих чавунах досить активно взаємодіє з оксидом вуглецю. В результаті такої взаємодії утворюється пароподібний поверхнево-активний монооксид кремнію (*SiO*) і первинні кристали графіту



За кольором і відбивною здатністю вони дуже близькі і тому погано розрізняються на шліфах у відбивному світлі. У прохідному світлі *SiO* досить легко ідентифікується за характерним буро-червоним забарвленням і високим показником світлопереломлення ($N_q = 2,15$ і $N_p = 2,06$). Морфологія пластинчатого графіту, його кількість, розподіл та розміри, зумовлені швидкістю протікання реакції, температурними і фізико-хімічними умовами розплаву та, відповідно, змінюванням активності реакції взаємодії кремнію з оксидом вуглецю [14].

Аналогічні результати отримано і для кулястого графіту. Під час модифікування чавунів магнієм також утворюються сполуки зниженої валентності. Взаємодія магнію з оксидом вуглецю відбувається дуже бурхливо з утворенням газових бульбашок:



У прохідному світлі виявлено субоксид магнію (*Mg₂O*), що складав оболонку газових бульбашок, де сформувалися вкраплення графіту кулястої форми. Субоксид магнію був світлосірого кольору зі слабким зеленуватим відтінком, напівпрозорий, ізотропний, що мав показник світлопереломлення $N = 1,770$ та вище. На відміну від субоксиду, оксид магнію (*MgO*) відрізняється кубічною кристалічною структурою, був прозорий, ізотропний, з показником світлопереломлення $N = 1,737$, що відповідає стехіометричному складу та легко визначається у прохідному світлі [15].

Співвідношення вагового та атомного процентів кисню та магнію у оксиді магнію (табл. 5) суттєво відрізняються від такого співвідношення у високоміцному чавуні, що, вірогідно, і пов'язано з утворенням субоксиду магнію.

Також відзначалося, що більш стійкі субоксиди домішкових елементів, що були присутні у розплаві (*Mg₂O*, *Al₂O*, *Ca₂O*, *Si₂O*), добре взаємодіють між собою, розчиняються у своїх оксидах, утворюючи тверді розчини складного та перемінного складу. Вони також дифундують разом з вуглецем та впливають на процес формування вкраплень графіту.

Встановлено, що у вкрапленнях графіту, окрім власне вуглецю, присутніми є інші елементи, що містяться у чавунах: магній (до 3,6 %), залізо (до 5,5 %), кисень (до 6,9 %) та іноді значно менша кількість інших елементів (алюмінію, кальцію, кремнію та ін.).

Відповідно даним мікрорентгеноспектрального аналізу вагові частки магнію, кремнію, кисню та заліза добре узгоджуються між собою та свідчать про утворення складного нестехіометричного складу субоксидів. Тобто на момент внесення кремнію або магнію до рідкого чавуну відбувається їх взаємодія з оксидом вуглецю та утворення складної метастабільної газової фази субоксидів магнію, кремнію, заліза та інших елементів. Слід відзначити, що парова субоксидна фаза заліза добре взаємодіє з оксидом вуглецю, внаслідок чого деякі агрегати графіту набувають магнітних властивостей.

Таким чином, виконаними дослідженнями встановлено, що парова субоксидна фаза заліза, кремнію, магнію та інших елементів приймають активну участь у формуванні вкраплень графіту різної морфології у чавунах.

Висновки.

1. Встановлено, що загальний вміст кисню у чавунах є дуже незначним (0,006...0,002 %). Найбільші значення відповідають білому чавуну, менші — чавунам з графітною фазою. Зага-

льний вміст кисню у чавунах зменшується за наявності елементів з високою до нього спорідненістю: кремнію, магнію та ін. Причому дещо менші значення вмісту кисню спостерігають у чавунах з компактним або кулястим графітом. Локальний мікрорентгеноспектральний аналіз показав, що кисень, головними чином, концентрувався у графітових вкрапленнях (до 7 % у пластинчатих та до 3,5 % у кулястих вкрапленнях), а у металевій матриці був майже відсутній.

2. Субоксиди магнію, кремнію, заліза та інших елементів приймають активну участь у формуванні вкраплень графіту різної морфології у чавунах. Так, утворення поверхнево-активного монооксиду кремнію за взаємодії кремнію з монооксидом вуглецю у рідкому чавуні відповідає за морфологічні особливості графітових вкраплень пластинчастої форми. У високоміцних чавунах морфологія кулястих вкраплень графіту також зумовлюється інтенсивністю протікання реакції магнію з монооксидом вуглецю з утворенням субоксиду магнію.

Бібліографічний список

1. **Dhindaw, B.** Nodular graphite formation in vacuum melted high purity Fe-C-Si alloys [Text] / B. Dhindaw, J. Verhoeven // Metallurgical Transactions A. – 1980. – Vol. 11, No. 6. – Pp. 1049-1057.
2. **Dhindaw, B.** Inverse chill and nodular graphite formation in synthetic cast irons melted and cast under vacuum [Text] / B. Dhindaw, J. Verhoeven // Transactions of the Japan institute of metals. – 1983. – Vol. 24, No. 2. – Pp. 71-80.
3. **Sadocha, J. P.** Mechanism of Graphite Spheroid Formation in Pure Fe-C-Si Alloys [Text] / J. P. Sadocha, J. E. Gruzleski // Proc. 2 nd Internat. Symposium on The Metallurgy of Cast Iron, 1976. – Pp. 443-459.
4. **Jung, S.** Influence of Sulfur and Oxygen on Graphite Morphology in Fe-C Alloys [Text] / S. Jung, H. Inoue, M. Yoshida, H. Nakae // Journal of Japan Foundry Engineering Society. – 2006. – Vol. 78, No. 4. – Pp. 175-180.
5. **Sommerfeld, A.** Nucleation of graphite in cast iron melts depending on manganese, sulphur and oxygen [Text] / A. Sommerfeld, B. Tonn // International Journal of Cast Metals Research. – 2008. – Vol. 21, No. 1-4. – Pp. 23-26.
6. **Elbel, T.** Behaviour of oxygen in cast irons [Text] / T. Elbel, J. Senberger, A. Zadera & J. Hampl // Archives of Materials Science and Engineering. – 2008. – Vol. 33, No. 2. – Pp. 111-116.
7. **Ten, E. B.** Oxygen State Forms in Cast Iron and their Effect on Graphite Crystallization [Text] / E. B. Ten // Key Engineering Materials. – Trans. Tech. Publications, 2011. – Vol. 457. – Pp. 43-47.
8. **Baranov, A. A.** On the modification of graphitized cast iron [Text] / A. A. Baranov, D. A. Baranov // The Physics of Metals and Metallography. – 2006. – Vol. 102, No. 4. – Pp. 384-390.
9. **Маркович, Е. И.** Наноструктурные процессы плавки и литья чугуна с пластинчатым графитом [Текст] / Е. И. Маркович, В. Ю. Стеценко // Литье и металлургия. – 2017. – № 1 (86). – С. 7-10.
10. **Маркович, Е. И.** Наноструктурные процессы плавки и литья чугуна с шаровидным графитом [Текст] / Е. И. Маркович, В. Ю. Стеценко // Литье и металлургия. – 2017. – № 3 (88). – С. 45-48.
11. **Сиротинский, П. С.** Роль остаточного содержания элементов-сфероидизаторов графита при длительной изотермической выдержке жидкого модифицированного чугуна [Текст] / П. С. Сиротинский, Е. И. Маркович, В. Ю. Стеценко // Литейное производство. – 1973. – № 11. – С. 27-31.
12. **Гиршович, Н. Г.** Кристаллизация и свойства чугуна в отливках [Текст] / Н. Г. Гиршович. – М. : Машиностроение, 1966. – 563 с.
13. **А. с. 866457 СССР, М. Кл³ G 01 N 15/10 C 21 C 5/52.** Способ определения содержания кислорода методом вакуум-плавления / В. А. Воронов, В. В. Добрадин, И. К. Майборода и др. - № 2866739/22-02; заявл. 09.01.80, опубл. 23.09.81, Бюл. № 35.
14. **Ivanov, V.** Silicon effect on the formation of graphite inclusions in gray cast iron [Text] / V. Ivanov, V. Pirozhkova, V. Lunev // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – No. 4(12). – Pp. 26-30.
15. **Ivanov, V.** Research of structure and formation of nodular graphite inclusions in ductile cast iron [Text] / V. Ivanov, V. Pirozhkova, V. Lunev // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – No. 3(5). – Pp. 31-36.

Иванов Валерий Григорьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры машин и технологии литейного производства (Запорожье, Украина). E-mail: ivanov@zntu.edu.ua

РОЛЬ КИСЛОРОДА ПРИ ФОРМООБРАЗОВАНИИ ГРАФИТА В ЧУГУНАХ

Исследовали влияние кислорода на формообразование графита в чугунах. Установлено, что незначительное количество кислорода, присутствующее в чугунах (0,002...0,003 %), способствует образованию оксидов пониженной валентности (субоксидов, например, магния, кремния, железа и других элементов), которые принимают активное участие в формировании включений графита различной

морфологии. Так, образование поверхностно-активного субоксида кремния при взаимодействии кремния с монооксидом углерода в жидком чугуна отвечает за морфологические особенности графитовых включений пластинчатой формы. В высокопрочных чугунах морфология шаровидных включений графита также обуславливается интенсивностью протекания реакции магния с монооксидом углерода и образованием субоксида магния.

Ключевые слова: чугун, кислород, морфология, включения графита, субоксиды

Ivanov Valeriy, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Machines and Technology of Casting Production, Zaporizhzhia National Technical University (Zaporizhzhia, Ukraine). E-mail: ivanov@zntu.edu.ua

THE ROLE OF OXYGEN AT THE GRAPHITE FORMATION IN IRONS

The influence of oxygen on the graphite formation in cast iron was investigated. It has been established that the insignificant amount of oxygen present in iron (0.002-0.003 %) promotes the formation of reduced valence oxides (suboxides, for example, magnesium, silicon, iron, etc.) that actively participate in the formation of graphite inclusions of different morphologies. Thus the formation of surface-active silicon suboxide while silicon interacting with carbon monoxide in liquid cast iron is responsible for the morphological features of plate-shaped graphite inclusions. In high-strength cast iron the morphology of spherical inclusions of graphite is also caused by the intensity of the reaction of magnesium with carbon monoxide and the formation of magnesium suboxide.

Key words: cast iron, oxygen, morphology, graphite inclusions, suboxides

Стаття надійшла до редакції 09.03.2018 р.
Рецензент, проф. Е.І. Цивірко

Текст даної статті знаходиться на сайті ЗДІА в розділі Наука
<http://www.zgia.zp.ua>