

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДЕФЕКТОВ ГАЗОВОГО ХАРАКТЕРА
В ДЕТАЛЯХ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА С ШАРОВИДНЫМ
ГРАФИТОМ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ ЛИТЬЯ
ПО ГАЗИФИЦИРУЕМЫМ МОДЕЛЯМ**Юров В.В.¹, Цыганов И.А.¹, Припадчева Н.А.²¹ Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия² ООО «ЧугунСпецСтрой», Липецк, Россия

Аннотация. Актуальной задачей оптимизации технологии литья по газифицируемым моделям является снижение дефектности отливок. Стремление уменьшить количество дефектов обусловлено повышением технико-экономических показателей производства и всё более серьёзными требованиями потребителей к качеству продукции. Особое внимание уделяется ответственным деталям, от которых требуется безотказность работы. Из-за наличия дефектов в фасонных деталях из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом снижается прочность, повышается вероятность возникновения прорывов и аварийных ситуаций. Наиболее опасными при эксплуатации деталей трубопроводов являются несплошности в теле отливки. Целью данной работы является изучение особенностей морфологического строения и химического состава образовавшихся продуктов реакций на поверхности экзогенных дефектов. Для этого в работе использовались методы сканирующей электронной микроскопии с возможностью определения микрорентгеноспектрального анализа. Изучение химического состава поверхности дефектов позволило соотнести элементы на поверхности газовых пор, трещин и раковин с элементами, содержащимися в литейных материалах: модификаторе, противопригарной краске и формовочной смеси. Полученные результаты микрорентгеноспектрального анализа свидетельствуют об образовании на поверхности дефектов продуктов и пленок сложного состава с высоким содержанием углерода и кислорода, что может свидетельствовать о комплексных механизмах формирования газовых дефектов. Основываясь на общепринятых аспектах теории литейных процессов и полученных результатах микрорентгеноспектрального анализа, нами предложены возможные механизмы и причины образования дефектов. Результаты работы позволят инженерам отдела технического контроля эффективно идентифицировать дефекты, а инженерам-технологам иметь представление об источниках их образования, что, в свою очередь, позволит оптимизировать технологию производства отливок из чугуна с шаровидным графитом.

Ключевые слова: газовые дефекты, высокопрочный чугун, литье по газифицируемым моделям, сканирующая электронная микроскопия, микрорентгеноспектральный анализ

© Юров В.В., Цыганов И.А., Припадчева Н.А., 2024

Для цитирования

Юров В.В., Цыганов И.А., Припадчева Н.А. Идентификация дефектов газового характера в деталях из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, изготовленных по технологии литья по газифицируемым моделям // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №3. С. 43-51. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-43-51>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

IDENTIFICATION OF DEFECTS OF GAS NATURE IN PARTS MADE OF HIGH-STRENGTH CAST IRON WITH SPHERICAL GRAPHITE MANUFACTURED ACCORDING TO THE LOST FOAM CASTING TECHNOLOGY

Yurov V.V.¹, Tsyganov I.A.¹, Pripadcheva N.A.²

¹ Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

² LLC ChugunSpetsStroy, Lipetsk, Russia

Abstract. A currently relevant task of optimizing the lost foam casting technology is to reduce defects of castings. This is due to an increase in technical and economic indicators of production and increasingly strong consumer requirements for the product quality. Special attention is paid to critical duty parts with the required long-term trouble-free operation. Defects in formed parts made of high-strength cast iron with spherical graphite reduce strength and increase the likelihood of breakthroughs and emergencies. The most dangerous defects in operation of pipeline parts are discontinuities in the casting body. This research is aimed at studying the features of the morphological structure and a chemical composition of the formed reaction products on the surface of exogenous defects. We used scanning electron microscopy methods with the possibility of determining an X-ray microanalysis. Studies on a chemical composition of the defect surface contributed to correlating the elements on the surface of gas pores, cracks and cavities with the elements contained in casting materials: a modifier, non-stick paint and the molding mixture. The X-ray microanalysis showed that products and films were formed on the surface of defects. They are characterized by a complex chemical composition with a high content of carbon and oxygen. This may indicate complex mechanisms of formation of gas defects. Based on the generally accepted aspects of the theory of foundry processes and the obtained X-ray microanalysis results, we have proposed possible mechanisms and causes of defect formation. The results described in this paper are useful for engineers of the technical control department to identify defects efficiently and process engineers to establish the causes and sources of their formation. This will optimize the production technology of castings made of cast iron with spherical graphite.

Keywords: gas defects, high-strength cast iron, lost foam casting, scanning electron microscopy, micro X-ray spectral analysis

For citation

Yurov V.V., Tsyganov I.A., Pripadcheva N.A. Identification of Defects of Gas Nature in Parts Made of High-Strength Cast Iron with Spherical Graphite Manufactured According to the Lost Foam Casting Technology. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 3, pp. 43-51. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-43-51>

Введение

Высокопрочный чугун с шаровидным графитом (ВЧШГ) обладает высокой прочностью и повышенной устойчивостью к коррозии, вследствие чего является востребованным конструкционным материалом на рынке металлопродукции [1, 2]. Из него изготавливают трубы, фасонные части трубопроводов, ответственные детали машин. Большое влияние на качество изготавливаемой продукции оказывают дефекты литья. Они могут приводить к снижению прочности, изменению размеров и формы детали, нарушению герметичности, что недопустимо для фасонных и конструктивных деталей, применяемых при эксплуатации [3-5].

Поэтому актуальной задачей литейного производства является снижение количества дефектов за счет оптимизации технологии производства.

Классификация дефектов согласно ГОСТ 19200-80 «Отливки из чугуна и стали. Термины и определения дефектов» включает:

- несоответствие по геометрии;
- дефекты поверхности;
- несплошности в теле отливки;
- включения;
- несоответствие по структуре.

Перспективной технологией для получения сложных тонкостенных отливок из ВЧШГ с внутренними каналами является метод литья по газифицируемым моделям (ЛГМ) [6]. Преимуществами данной технологии выступают:

- высокая точность отливок любой сложности;
- экологичность производства;
- высокое сходство деталей при серийном производстве [6].

Особенностью технологии является высокое газовыделение из-за термодеструкции пенополистирола. Согласно [6], при термодеструкции пенополистирола образуются парообразные продукты, представленные рядом углеводородов (C_6H_6 , C_7H_8 , C_8H_8), газообразные – H_2 , CO , N_2 , CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 , C_2H_2 , C_3H_6 ,

C_3H_8 , $i-C_3H_{12}$ и твердые – в виде сажистых углеродсодержащих соединений.

Продукты термодеструкции способны взаимодействовать с материалами формовочной смеси и противопожарной краски [6, 7], из-за чего состав и свойства последних могут оказывать влияние на качество получаемых отливок из ВЧШГ [8].

Наиболее опасными для деталей трубопроводов выступают несплошности в теле отливки, представленные дефектами усадочного и/или газового характера. Если первые были изучены в работах [9, 10], где описываются основные причины, механизмы образования и способы устранения, то со вторыми вопрос обстоит сложнее и требует детального исследования с установлением механизмов и причин их образования.

При ЛГМ из-за повышенного газовыделения и несоблюдения технологии производства в деталях могут наблюдаться обвалы песчаной формы [11], повышенное количество дефектов газового характера с повышенным содержанием углерода [12, 13]. Такие дефекты могут иметь маленькие размеры, из-за чего сложно идентифицируются при обычном визуальном осмотре, однако они снижают прочность, нарушают сплошность и герметичность отливок.

На данный момент характерными признаками для выявления дефектов экзогенного газового характера выступают их форма, цвет и расположение. Однако такой подход, во-первых, не всегда обеспечивает высокую точность анализа, а во-вторых, не подходит для определения сложных или специфичных дефектов. Помочь в установлении вида дефекта и механизма его образования может информация о химическом составе поверхности.

Стоит заметить, что ГОСТ 19200-80 не учитывает специфику различных технологий литья, а также не содержит сведений о причинах появления и мерах предупреждения образования дефектов.

Целью данной работы является установление возможных причин образования специфичных дефектов в деталях из ВЧШГ, полученных по технологии

ЛГМ, в результате исследования их морфологических особенностей и химического состава поверхности.

Материалы и методы исследования

Для проведения исследования были отлиты детали из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом по технологии ЛГМ. Для модифицирования использовался комплексный модификатор, содержащий Mg, Ca и редкоземельные металлы La, Ce. Температура разлива находилась в диапазоне 1450-1500°C. Химический состав представлен в **табл. 1**.

Таблица 1. Химический состав высокопрочного чугуна, мас. %

Table 1. Chemical composition of high-strength cast iron, wt. %

C	Si	Mn	P	S	Mg
3,4-3,7	2,4-2,8	0,3-0,6	≤0,03	≤0,01	0,03-0,06

Образцы для исследований были механически вырезаны из дефектных участков отливок.

Исследования проводились на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA 3 SBH при ускоряющем напряжении 15-20 кВ в режимах обратноотраженных (BSE-детектор) и вторичных электронов (SE-детектор). Химический состав поверхности дефекта определялся методом микроанализа с использованием энергодисперсионной приставки Oxford Instruments, обработка полученных результатов проводилась программным комплексом Inca.

Полученные результаты и их обсуждение

На **рис. 1** представлена крупная газоусадочная раковина неправильной вытянутой формы. Её поверхность представлена тонкодисперсными частицами, микроанализ (МРСА) которых представлен в **табл. 2**.

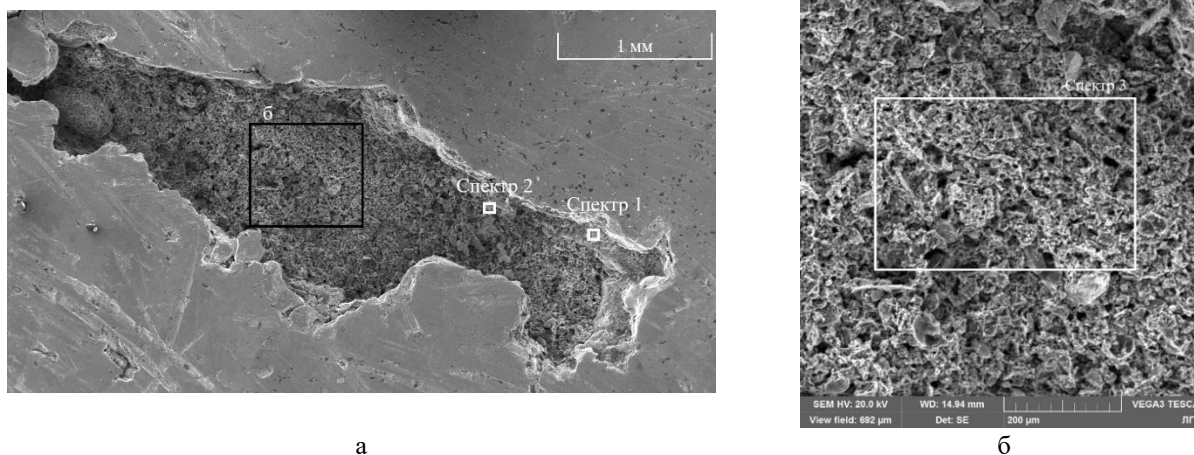


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение газоусадочного дефекта: а – общий вид, $\times 75$; б – $\times 400$

Fig. 1. Electron microscopy image of the gas and shrinkage defect: a is a general view, $\times 75$, b is $\times 400$

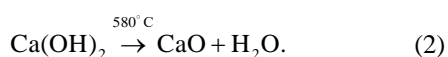
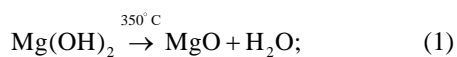
Таблица 2. Результаты микрорентгеноспектрального анализа поверхности дефекта на рис. 1, мас. %
Table 2. The X-ray microanalysis of the surface of the defect shown in Figure 1, wt. %

Спектр	C	O	Na	Mg	Al	Si	Mn	S	K	Ca	Ti	Ce	Fe
1	35,41	16,81	0,15	4,53	0,28	2,43	–	0,20	–	0,29	0,15	0,46	39,30
2	22,68	8,44	–	–	0,28	3,17	0,32	–	–	–	–	–	65,11
3	34,56	40,82	0,5	0,26	1,91	17,26	–	–	0,62	1,20	–	–	2,60

Повышенное содержание Mg, Ca, Ti, Ce в спектре 1 свидетельствует о выходе элементов модификатора на границу кристаллов, что указывает на протекание усадочных процессов при дефектообразовании.

Присутствие Na и K на поверхности дефекта может свидетельствовать о миграции данных элементов из противоположной краски или формовочной смеси [14], где они содержатся в виде оксидов, в расплав чугуна при заливке. Однако Na₂O и K₂O достаточно стабильны и переходят в газообразную форму при температурах, превышающих температуру разлива чугуна. Но при повышенной влажности могут образоваться соответствующие гидроксиды KOH, NaOH, температуры кипения которых равны 1325 и 1403°C соответственно, что, в свою очередь, меньше температуры заливаемого чугуна в данном эксперименте.

В противоположной краске также содержатся оксиды Mg и Ca, температура кипения которых равна 3600 и 2850°C соответственно. Их миграция в область дефекта совместно с Na и K также возможна только из «сырой» противоположной краски, где из-за повышенной влажности MgO и CaO переходят в соответствующие гидроксиды, они уже менее стабильны. Так, например, температура разложения Mg(OH)₂ равна 350°C, а Ca(OH)₂ – 580°C, что существенно меньше температуры заливаемого чугуна:

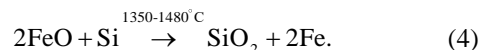
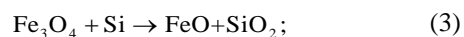


Выделившиеся газообразные продукты H₂O, KOH, NaOH при достаточной газопроницаемости формовочных материалов успешно отводятся от формы с помощью вакуумной системы. Однако при повышении газотворности процесс удаления затрудняется, вследствие чего газы будут способны проникать в форму и реагировать с расплавом.

Высокое содержание кислорода на поверхности дефекта может быть объяснено взаимодействием паров воды и жидкого расплава с выделением газообразного водорода и оксидов железа.

Высокое содержание Si на поверхности дефекта в спектре 3 свидетельствует о раскислении оксидов железа по формулам (3) и (4) с образованием диоксида крем-

ния (SiO₂). Стоит заметить, что протекание реакций возможно в температурном интервале 1350-1480°C:



Повышенное содержание углерода указывает на участие в процессе дефектообразования углеродсодержащих продуктов деструкции пенополистирола, которые способны:

- осаждаться на поверхности дефекта;
- взаимодействовать с газами и/или расплавами, попавшими в чугун из формовочных материалов, и образовывать карбонаты.

На рис. 2, а представлен дефект сферической формы. Согласно результатам МРСА, представленным в табл. 3, на поверхности дефекта наблюдается повышенное содержание углерода и кислорода.

Формирование на поверхности слоя углеродсодержащих материалов может свидетельствовать об участии в процессе дефектообразования продуктов деструкции пенополистирола, в частности СО и сажи, которые не были полностью удалены из формы при заливке расплава чугуна.

Повышенное содержание кислорода может указывать сразу на несколько причин:

- попадание в расплав шлака при заливке;
- введение в расплав влажного модификатора;
- образование оксидов и карбонатов из-за избыточного давления СО, выделившегося при термодеструкции пенополистирола.

На рис. 2, б представлена шлакогазовая раковина, химический состав поверхности которой представлен в табл. 4.

Высокое содержание кислорода и редкоземельных металлов указывает на образование шлаков в процессе модифицирования. Их распределение в дефекте характерно для затвердевшего комплексного оксидного расплава. Другой особенностью дефекта, представленного на рис. 2, б, является образование между шлаком и основным металлом промежуточного слоя с повышенным содержанием углерода, образование которого могло быть следствием захвата расплавом продуктов термодеструкции пенополистирола.

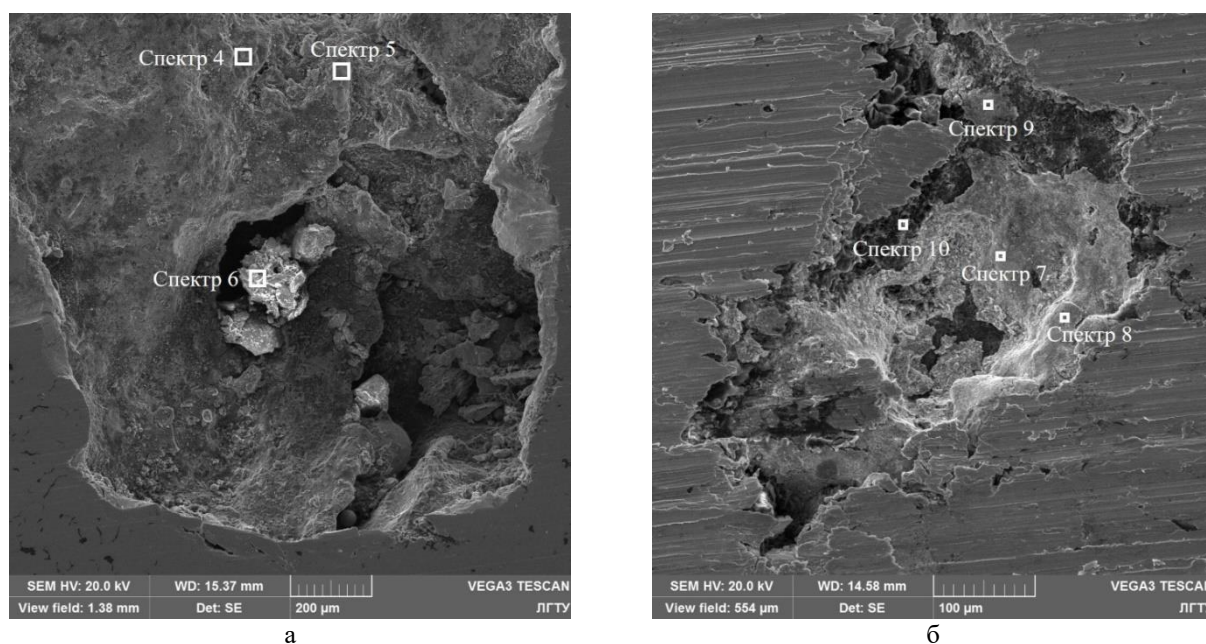


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение дефектов, идентифицированных как «шлакогазовая раковина»: а – дефект 1, $\times 200$; б – дефект 2, $\times 500$

Fig. 2. Electron microscopy image of defects identified as a “slag gas cavity”: a is defect 1, $\times 200$, б is defect 2, $\times 500$

Таблица 3. Результаты микрорентгеноспектрального анализа поверхности дефекта на рис. 2, а, мас. %

Table 3. The X-ray microanalysis of the surface of the defect shown in Figure 2a, wt. %

Спектр	C	O	Mg	Al	Si	Mn	S	Ca	Cr	Fe	La	Ce
4	41,35	25,85	–	0,67	0,73	–	0,17	0,68	–	30,56	–	–
5	6,49	2,75	–	–	2,91	–	–	–	–	87,85	–	–
6	25,38	16,12	0,1	0,16	1,49	0,3	–	–	–	56,45	–	–

Таблица 4. Результаты микрорентгеноспектрального анализа поверхности дефекта на рис. 2, б, мас. %

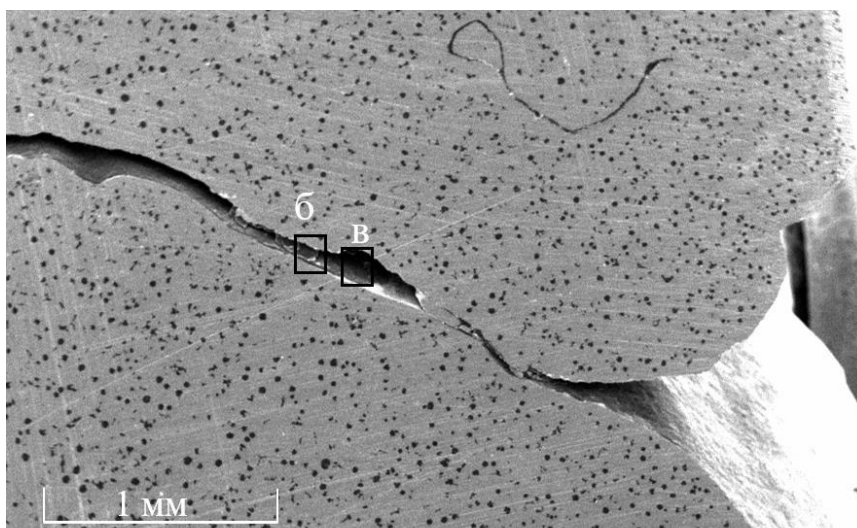
Table 4. The X-ray microanalysis of the surface of the defect shown in Figure 2 б, wt. %

Спектр	C	O	Mg	Al	Si	Mn	S	Ca	Cr	Fe	La	Ce
7	12,00	26,53	2,88	0,63	2,63	–	4,07	0,76	–	26,16	8,83	15,25
8	11,82	3,01	0,41	0,4	0,38	–	0,77	0,35	–	38,59	10,98	22,40
9	12,17	30,30	6,06	2,97	4,40	–	1,78	1,12	1,20	–	7,82	16,02
10	59,40	15,63	–	0,13	0,72	–	–	–	–	24,12	–	–

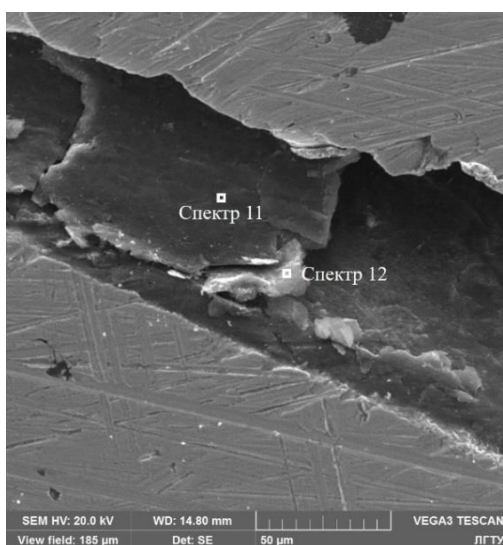
На рис. 3 представлен дефект, идентифицированный как спай. Причиной формирования данного дефекта является не полностью слившиеся потоки чрезмерно охлажденной, окисленной поверхности металла. Однако при изготовлении деталей по методу литья по газифицируемым моделям процесс дефектообразования может быть интенсифицирован за счет захвата расплавом и дальнейшего пиролиза продуктов термодеструкции пенополистирола. Что сначала приводит к осаждению пироуглерода на поверхность металла, а затем, при охлаждении, способствует накоплению на поверхности пироуглерода атомарно-

го углерода. Это подтверждается результатами МРСА, представленными в табл. 5.

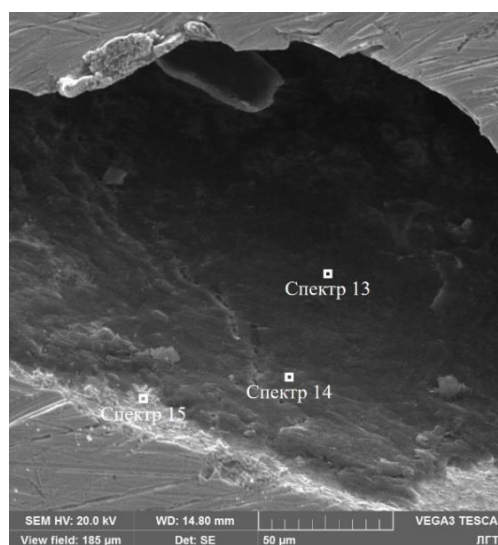
На рис. 4 представлен комплексный дефект, состоящий из раковины диаметром 200 мкм и микротрещин, поверхность которых, согласно результатам МРСА в табл. 6, покрыта углеродсодержащими продуктами. Повышенное содержание углерода на поверхности дефекта и присутствие микротрещин свидетельствует, как уже ранее говорилось, об осаждении углеродсодержащих продуктов на поверхность дефекта из-за захвата продуктов термодеструкции пенополистирола и их дальнейшего пиролиза.



а



б



в

Рис. 3. Электронно-микроскопическое изображение дефекта «спай»: а – общий вид, $\times 75$; б – поверхность спая $\times 1500$; в – поверхность спая, $\times 1500$

Fig. 3. Electron microscopy image of the cold shut defect: a is a general view, $\times 75$, б is the cold shut surface, $\times 1500$, в is the cold shut surface, $\times 1500$

Таблица 5. Результаты микрорентгеноспектрального анализа поверхности дефекта на рис. 3, мас. %
Table 5. The X-ray microanalysis of the surface of the defect shown in Figure 3, wt. %

Спектр	C	O	Si	Fe
11	84,99	5,85	–	9,16
12	94,49	3,15	0,11	2,26
13	73,8	12,99	–	13,22
14	78,84	10,37	–	10,79

Однако первопричинами образования дефектов могли выступить:

– усадочные процессы, из-за которых образовались микротрещины (рис. 4, а);

– окисление модификатора, из-за чего образовалась газоплаковая раковина (рис. 4, б).

На основе проведенного исследования в табл. 7 приведены предположительные причины возникновения рассмотренных дефектов.

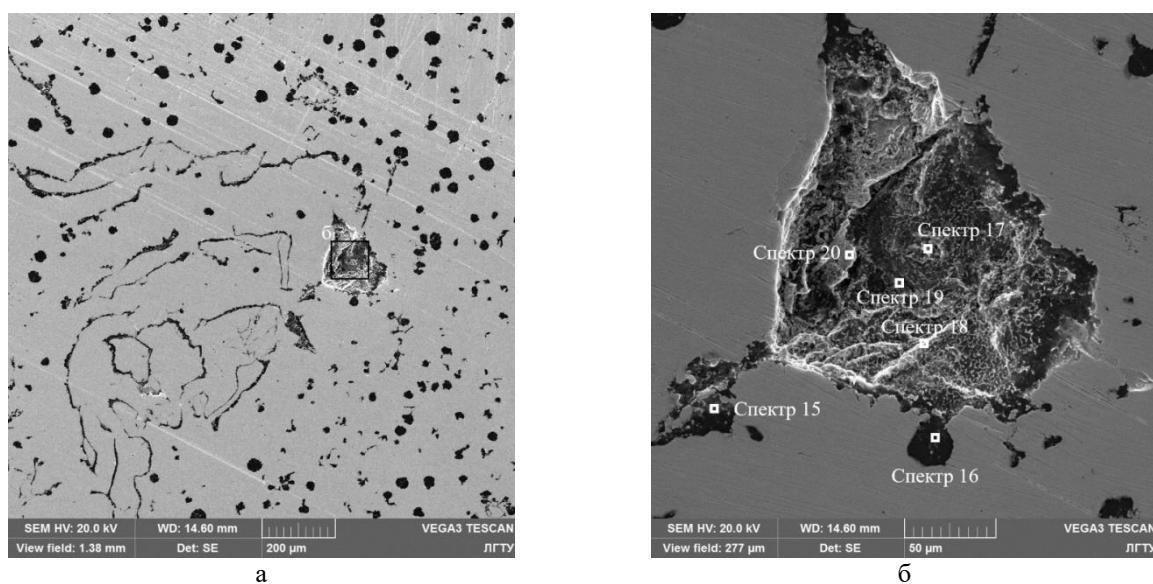


Рис. 4. Электронно-микроскопические изображения дефектов:

а – микротрещины, $\times 200$; б – шлакогазовая раковина, $\times 1000$ Fig. 4. Electron microscopy images of defects: a is microcracks, $\times 200$, б is a slag gas cavity, $\times 1000$

Таблица 6. Результаты микрорентгеноспектрального анализа поверхности дефекта на рис. 4, б, мас. %

Table 6. The X-ray microanalysis of the surface of the defect shown in Figure 4б, wt. %

Спектр	C	O	Mg	Al	Si	Ca	La	Ce	Fe
15	75,52	–	–	–	0,60	–	–	–	23,87
16	94,82	2,47	–	–	–	–	–	–	2,61
17	24,39	39,25	17,05	1,78	9,83	0,32	1,86	3,72	1,80
18	51,73	3,06	0,64	–	0,23	–	–	–	44,34
19	37,76	–	0,35	–	1,29	–	–	–	60,61
20	97,33	1,42	–	–	–	–	–	–	1,25

Таблица 7. Причины возникновения дефектов

Table 7. Causes of defects

Дефект	Причины возникновения
Газоусадочная раковина	<ul style="list-style-type: none"> – выделение газа из формовочной смеси и/или противопригарной краски в незатвердевшую отливку; – низкая газопроницаемость и высокая влажность материалов формовочной смеси и противопригарной краски; – высокая температура заливки расплава в форму
Шлакогазовая раковина	<ul style="list-style-type: none"> – восстановление окисленного металла с образованием пузырей и захватом шлаковых частиц; – высокое содержание газов в исходном расплаве до модифицирования; – введение в расплав влажного модификатора; – превышено содержание РЗМ в модификаторе; – превышена температура модифицирования
Дефекты с высоким содержанием углерода на поверхности: – спай – микротрещины – шлакогазовая раковина	<ul style="list-style-type: none"> – избыточное давление газообразных продуктов термодеструкции пенополистирола из-за повышенной газотворности материалов формовочной смеси и/или противопригарной краски; – ухудшение жидкотекучести расплава; – высокая температура расплава при заливке, которая приводит к пиролизу углеводородов (продуктов термодеструкции ППС); – прерывистое течение расплава при заливке; – медленная заливка, слабый напор металла

Заключение

Методами сканирующей электронной микроскопии с применением МРСА проведена идентификация дефектов типа «несплошности» в чугунных отливках, изготовленных методом ЛГМ. Показано, что МРСА позволяет уточнить химический состав поверхности дефекта.

По результатам исследования установлено, что при литье по газифицируемым моделям формирование дефекта усложняется выделением продуктов термодеструкции пенополистирола, из-за чего их размеры увеличиваются, а на поверхности образуются углерод- и кислородсодержащие продукты реакции.

Установлено, что образование газовых дефектов в чугунных отливках, изготовленных по технологии ЛГМ, имеет сложный характер и, как правило, осложнено сразу несколькими сопутствующими причинами, и в зависимости от механизма дефектообразования изменяется химический состав поверхности дефекта.

Так, например совместное присутствие Na, K, Mg, Ca свидетельствует об участии в образовании дефекта материалов формовочной смеси или противопригарной краски, Mg, Ca, PЗМ – модификатора. Высокое содержание С и О указывает на неполное удаление или захват расплавом продуктов термодеструкции пенополистирола.

Список источников

1. Строительство трубопроводов из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом / М.А. Лебедева, Э.Ф. Идиятуллина, М.С. Чухлатый, А.В. Набоков // Инженерный вестник Дона. 2020. №1(61). С. 31.
2. Костин С.И., Минченков А.В., Гумеров К.М. Трубы из высокопрочного чугуна в нефтегазовой отрасли // Территория Нефтегаз. 2012. №12. С. 28-31.
3. Жуков А.А., Маццарелли Д., Беляков А.А. Производство отливок из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом / под ред. А.И. Белякова. М.: Машиностроение, 2010. 711 с.
4. Совершенствование литейной технологии получения корпусных отливок из ВЧШГ для энергомашиностроения в условиях импортозамещения / М.Ю. Щеголев, А.А. Бречко, Ф.Н. Дмитриев, Д.В. Беляев // Литейщик России. 2023. №10. С. 22-29.
5. Воронин Ю.Ф., Камаев В.А. Атлас литейных дефектов. Черные сплавы. М.: Машиностроение – 1, 2005. 327 с.
6. Шуляк В. Литье по газифицируемым моделям. СПб.: НПО «Профессионал», 2007. 408 с.
7. Ovcharenko P.G., Kuz'minykh E.V., Lad'yanov V.I. Interaction of a Nonstick Corundum Coating with Iron-Carbon Melts under Lost-Foam Casting Conditions. Russian Metallurgy (Metally). 2020, vol. 2020, no. 2, pp. 115-120. DOI: 10.1134/S003602952002010X
8. Влияние материала модели и состава краски при ЛГМ на качество отливки / С.К. Баринаова, С.С. Квон, В.Ю. Куликов и др. // Литейное производство. 2023. №5. С. 32-34.
9. Takemoto Y., Mizumoto M. & Kinno K. Internal Porosity Defects in Ductile Cast Irons. Inter Metalcast. 2021, vol. 15, pp. 916-929. DOI: 10.1007/S40962-020-00527-X
10. Sertucha J., Lacaze J. Casting Defects in Sand-Mold Cast Irons – An Illustrated Review with Emphasis on Spheroidal Graphite Cast Irons // Metals 2022, vol. 12, no. 3, 504. DOI: 10.3390/MET12030504
11. Sun W., Littleton H.E., & Bates C.E. Formation mechanism of gas cavity defects in lost foam iron castings. International Journal of Cast Metals Research. 2003, vol. 16, iss. 6, pp. 549-553. DOI: 10.1080/13640461.2003.11819634
12. Jezierski J., Jureczko M., Dojka R. The Impact of Process Factors on Creating Defects, Mainly Lustrous Carbon, during the Production of Ductile Iron Using the Lost-Foam Casting (LFC) Method // Metals. 2020, vol. 10, no. 8, 1022. DOI: 10.3390/MET10081022
13. Joo Mae Jeon, Soo Jo Lee, Kyeong Hwan Choe, Jeung-Soo Huh. Gas Pressure Effect on Sand Collapse in Kinetic Zone of Lost-Foam Casting // Advances in Materials Science and Engineering, 2020, vol. 2020, 5861017, 9 p. DOI: 10.1155/2020/5861017
14. Исследование деструкции кварцевого песка после литья по газифицируемым моделям / В.В. Юров, И.А. Цыганов, В.С. Кузнецов, Н.А. Припадчева // Литейное производство. 2024. №3. С. 23-27.

References

1. Lebedeva M.A., Idiyatullina E.F., Chukhlatay M.S., Nabokov A.V. Construction of pipelines made of high-strength cast iron with spherical graphite. *Inzhenerny vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don]. 2020;(1(61)):31. (In Russ.)
2. Kostin S.I., Minchenkov A.V., Gumerov K.M. High-strength cast iron pipes in the oil and gas industry. *Territoriya Neftegaz* [The Area of Oil and Gas]. 2012;(12):28-31. (In Russ.)
3. Zhukov A.A., Mazzarelli D., Belyakov A.A. *Proizvodstvo otlivok iz vysokoprochnogo chuguna s sharovidnym grafitom* [Production of castings from high-strength cast iron with spherical graphite]. Belyakov A.I. (Ed.). Moscow: Mashinostroenie, 2010, 711 p. (In Russ.)
4. Shchegolev M.Yu., Brechko A.A., Dmitriev F.N., Belyaev D.V. Improvement of the foundry technology for producing hull castings from high-strength cast iron with spherical graphite for power engineering in the context of import substitution. *Liteyshchik Rossii* [Foundry of Russia]. 2023;(10):22-29. (In Russ.)
5. Voronin Yu.F., Kamaev V.A. *Atlas liteynykh defektov. Chernye splavy* [Atlas of foundry defects. Ferrous alloys]. Moscow: Mashinostroenie – 1, 2005, 327 p. (In Russ.)

6. Shulyak V. *Lite po gazifitsiruemyim modelyam* [Lost foam casting]. Saint Petersburg: NPO Professional, 2007, 408 p. (In Russ.)
7. Ovcharenko P.G., Kuzminykh E.V., Ladyanov V.I. Interaction of a nonstick corundum coating with iron-carbon melts under lost-foam casting conditions. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2020;2020:115-120. DOI:10.1134/S003602952002010X
8. Barinova S.K., Kwon S.S., Kulikov V.Yu. et al. Influence of the model material and the paint composition in LFC on the quality of the casting. *Liteynoe proizvodstvo [Foundry]*. 2023;(5):32-34. (In Russ.)
9. Takemoto Y., Mizumoto M., Kinno K. Internal porosity defects in ductile cast irons. *Inter Metalcast*. 2021;15:916-929. DOI: 10.1007/S40962-020-00527-X
10. Sertucha J., Lacaze J. Casting defects in sand-mold cast irons – An illustrated review with emphasis on spheroidal graphite cast irons. *Metals*. 2022;12(3): Article ID 504. DOI:10.3390/met12030504
11. Sun W., Littleton H.E., Bates C.E. Formation mechanism of gas cavity defects in lost foam iron castings. *International Journal of Cast Metals Research*. 2003;16(6):549-553. DOI: 10.1080/13640461.2003.11819634
12. Jezierski J., Jureczko M., Dojka R. The impact of process factors on creating defects, mainly lustrous carbon, during the production of ductile iron using the lost-foam casting (LFC) method. *Metals*. 2020;10(8):Article ID 1022. DOI:10.3390/met10081022
13. Joo Mae Jeon, Soo Jo Lee, Kyeong Hwan Choe, Jeung-Soo Huh. Gas pressure effect on sand collapse in kinetic zone of lost-foam casting. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2020;2020(1):Article ID 5861017. DOI:10.1155/2020/5861017
14. Yurov V.V., Tsyganov I.A., Kuznetsov V.S., Pripadcheva N.A. Study on the destruction of quartz sand after lost foam casting. *Liteynoe proizvodstvo [Foundry]*. 2024;(3):23-27. (In Russ.)

Поступила 17.04.2024; принята к публикации 21.05.2024; опубликована 30.09.2024
Submitted 17/04/2024; revised 21/05/2024; published 30/09/2024

Юров Владислав Викторович – аспирант,
Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия.
Email: vladyuroff@yandex.ru. ORCID 0009-0006-7290-8749

Цыганов Игорь Анатольевич – кандидат технических наук, доцент,
Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия.
Email: zyganov.igor@gmail.com. ORCID 0000-0001-6446-2368

Припадчева Наталья Алексеевна – начальник научно-производственной лаборатории,
ООО «ЧугунСпецСтрой», Липецк, Россия.
Email: sciencchss@mail.ru.

Vladislav V. Yurov – postgraduate student,
Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia.
Email: vladyuroff@yandex.ru. ORCID 0009-0006-7290-8749

Igor A. Tsyganov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia.
Email: zyganov.igor@gmail.com. ORCID 0000-0001-6446-2368

Natalya A. Pripadcheva – Head of the Research and Development Laboratory,
LLC ChugunSpetsStroy, Lipetsk, Russia.
Email: sciencchss@mail.ru.