УДК 669.017

DOI: 10.35211/1990-5297-2021-7-254-21-25

*Н. И. Габельченко, Н. А. Кидалов, А. А. Белов, Е. Ю. Карпова
М. Д. Безмогорычный, С. Р. Поляк*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ СЕРОГО ЧУГУНА
МЕТОДОМ ТЕРМОГРАФИЧЕСКОГО АНАЛИЗА**

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: mitlp@vstu.ru

Работа посвящена исследованию влияния экзотермической углеродосодержащей добавки облицовочного слоя песчано-глинистой формовочной смеси на эвтектическое превращение чугуна. Для этого применялся метод термографического анализа и проводился металлографический анализ исследуемого металла. Показано, что результаты, полученные при термографическом анализе, имеют корреляцию со структурой чугуна. Введение углеродосодержащей добавки в состав облицовочной смеси привело к формированию благоприятной структуры опытного образца, характерной серому чугуну.

Ключевые слова: отливка, термографический анализ, чугун, эвтектическое превращение, углеродосодержащая добавка, переохлаждение.

© Габельченко Н. И., Кидалов Н. А., Белов А. А., Карпова Е. Ю., Безмогорычный М. Д., Поляк С. Р., 2021

*N. I. Gabelchenko, N. A. Kidalov, A. A. Belov, E. Y. Karpova
M. D. Bezmogorychnyy, S. R. Polyak*

STUDY OF THE FORMATION OF THE STRUCTURE OF GRAY CAST IRON BY THE METHOD OF THERMOGRAPHIC ANALYSIS

Volgograd State Technical University

The work is devoted to the study of the effect of an exothermic carbon-containing additive of a facing layer of a sandy-clay molding mixture on the eutectic transformation of cast iron. For this, the method of thermographic analysis was used and metallographic analysis of the metal under study was carried out. It is shown that the results obtained by thermographic analysis have a correlation with the structure of cast iron. The introduction of a carbon-containing additive into the composition of the facing mixture led to the formation of a favorable structure of the prototype, characteristic of gray cast iron.

Keywords: casting, thermographic analysis, cast iron, eutectic transformation, carbon-containing additive, undercooling.

Введение

Получение качественных отливок с высокими механическими и эксплуатационными свойствами является важнейшей задачей литейного производства. В условиях современных требований производства контроль качества получаемых отливок невозможно представить без применения высокоточных и энергосберегающих экспресс-методов анализа химического состава, структуры и механических свойств получаемого металла. Одним из таких методов является термографический анализ, получивший широкое распространение в последние годы [1–7]. Он основан на выделении температурных площадок, соответствующих температурам ликвидуса и солидуса на кривой охлаждения затвердевающего металла, залитого в кристаллизационный стаканчик [8, 9]. Анализируя по специальной программе совокупность записанных точек, определяют с высокой достоверностью следующие характеристики чугуна: пиковую температуру (TP); температуру ликвидуса (TL); углеродный эквивалент (% CEL); индекс насыщения (степень эвтектичности, SC); предел прочности на разрыв (RM); индекс качества (Z/H); температуру солидуса (TS); содержание кремния (% Si); содержание углерода

(% C); индекс графитизации (K); количество эвтектического графита (MEG); переохлаждение (TM); минимальную температуру переохлаждения (–T); максимальную температуру переохлаждения (+T); разность между минимальной и максимальной температурами переохлаждения (ΔT). По кривой охлаждения заливаемого сплава можно делать определенные заключения о поведении расплава при его кристаллизации и дальнейшем охлаждении, качественно определять фазовые превращения, определять температуру начала и конца фазового превращения, определять скорость, равномерность процесса и т. д. Таким образом, термографический анализ является надежным инструментом для контроля качества получаемого чугуна. Главными преимуществами данного способа являются: высокая производительность, точность и экономичность.

Целью данного исследования служит изучение влияния регулирования скорости охлаждения на формирование структуры серого чугуна при помощи термографического анализа.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования являлся доэвтектический чугун, состав которого представлен в таблице ниже.

Химический состав чугуна

Значения элементов в пробах (масс. %)										S _c *
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Fe	
2,8	0,78	2,28	0,06	0,081	0,176	0,134	0,123	0,008	ост.	0,767

$$*S_c = C/4,3 - (0,3(\%Si) + 0,027(\%Mn) - 0,3(\%P) - 0,4(\%S) + 0,063(\%Cr) - 0,053(\%Ni) + 0,074(\%Cu) + 0,015(\%Mo)) [10]$$

Реализация данного исследования осуществлялась при помощи комплекса для термографического анализа чугуна (Quik-LAB E IV), снабженного программно-аппаратным комплексом для обработки результатов термиче-

ского анализа с установленным ПО «Melt-Control 2020-Win» (рис. 1).

Для достижения поставленной цели на основе уже существующего метода термографического анализа чугуна была разработана своя

Рис. 1. Комплекс для термографического анализа чугуна

Рис. 2. Вид экспериментального стаканчика для термографического анализа чугуна

уникальная методика, применяемая к тонкостенным отливкам. Она позволяет оценивать влияние экзотермических углеродосодержащих добавок, вводимых в состав облицовочного слоя формовочной смеси на изменение характера затвердевания чугуна. Для этого в штат-

ный стаканчик (пробу) при помощи шаблона формируется облицовочная смесь различного состава (рис. 2).

В качестве добавки, замедляющей скорость охлаждения чугуна, по предварительным исследованиям был выбран низкосернистый мазут топочный М-100 [11,12]. Для сравнения готовился контрольный стаканчик (проба) со штатным составом облицовочного слоя формовочной смеси – 94 % кварцевый песок марки К₂О₂02 (ГОСТ 2138-91), 6 % бентонитовая глина марки БСТ₂ (ГОСТ 28177-89). Влажность смеси составляла 2,5 %. В состав опытной облицовочной смеси вводили мазут топочный М-100 (ГОСТ 10585-2013) в количестве 3 % сверх общей массы смеси [13–15].

Плавка чугуна осуществлялась в тигельной индукционной плавильной установке (ИТПЭ-0,018/0,03 ТрМ1). Далее расплавленный чугун с помощью специальной ложки разливался в экспериментальные стаканчики при температуре равной 1350±15 °С. При этом комплекс для термографического анализа записывал кривые охлаждения и обрабатывал полученные данные.

Результаты и их обсуждение

В процессе заливки жидкого металла в опытный стаканчик происходила термоокислительная деструкция добавки облицовочной формовочной смеси, за счет которой происходило замедление скорости охлаждения опытного образца в интервале эвтектического превращения.

Кривые охлаждения контрольного (без добавок в облицовочном слое формовочной смеси) и опытного (с введением в состав смеси мазута топочного М-100) образца представлены на рис. 3.

Рис. 3. Кривые охлаждения контрольной (а) и опытной (б) отливок:

ТР – пиковая температура; ТЛ – температура ликвидус; ТEmin – минимальная температура переохлаждения расплава; ТEmax – максимальная температура эвтектического превращения

Из них видно, что за счет термоокислительной деструкции мазута в интервале эвтектического превращения удалось снизить ΔT (переохлаждение расплава относительно равновесной эвтектической температуры на диаграмме Fe-C) с 22 до 27 °С и качественно изменить температурную площадку эвтектического превращения с увеличением T_{max} (максимальной температуры эвтектического превращения) с 1127 до 1136 °С, что говорит о росте включений графита в чугуна. Из полу-

ченных образцов были вырезаны и подготовлены микрошлифы для проведения металлографического исследования морфологии графита (рис. 4, а, б) и действительной структуры (рис. 4, в, г). Травление микрошлифов для выявления действительной структуры производилось в 4%-м растворе азотной кислоты в этиловом спирте в соответствии с методикой [16]. Анализ включений графита и действительной структуры осуществлялся в соответствии с ГОСТ 3443-87 [17].

Рис. 4. Микроструктура контрольного (а, в) и опытного (б, г) образцов

Снижение переохлаждения опытного расплава и увеличение максимальной температуры эвтектического превращения привело к увеличению размера, количества включений графита и более благоприятному распределению, что соответствует ПГф2-ПГд25-ПГр1-ПГ12. Также это привело к значительному снижению количества ледебурита в структуре опытного чугуна.

Заключение

Таким образом, результаты металлографического анализа коррелируют с термографическим анализом, что говорит о его высокой достоверности.

Дальнейшие исследования будут направлены на изучение формирования структуры и свойств чугуна при дифференцированном

(разнонаправленном) охлаждении в заданных структурно-чувствительных интервалах кристаллизации при помощи комплекса для термографического анализа чугуна (Quik-LAB E IV), снабженного программно-аппаратным комплексом для обработки результатов термического анализа с установленным ПО «Melt-Control 2020-Win» по собственной разработанной методике, применяемой к тонкостенным отливкам.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Fraš E.* The transition from gray to white cast iron during solidification: Part III. Thermal analysis // *E. Fraš, M. Górný, H.F. López / Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.* 2005. Т. 36. № 11. С. 3093–3101.
2. *Neacsu E. L.* и др. Carbide to graphite transition control by thermal analysis in grey cast irons // *Metals (Basel)*. 2020. Т. 10. № 8. С. 1–18.
3. *Shinde V. D.* Thermal Analysis of Ductile Iron Casting // *Advanced Casting Technologies. : InTech*, 2018.
4. *Boonmee S.* и др. Prediction of chill formation in gray irons by thermal analysis. 2020. 87–93 с.
5. *Stan I.* и др. Solidification Pattern of Si-Alloyed, Inoculated Ductile Cast Irons, Evaluated by Thermal Analysis // *Metals (Basel)*. 2021. Т. 11. № 5. С. 846.
6. *Stefanescu D. M.* Thermal analysis-theory and applications in metalcasting // *Int. J. Met.* 2015. Т. 9. № 1. С. 7–22.
7. *Svidró P.* Extended method of volume change measurements during solidification of lamellar graphite iron / *P. Svidró, A. Diószegi, P. G. Jönsson // Materials Science Forum*. : Trans Tech Publications Ltd, 2018. С. 163–170.
8. *Дмитриева, Е. Э.* Контрольно-измерительное оборудование для литейного производства / *Е. Э. Дмитриева, Э. А. Шелковий, А. С. Яковлева // ЛИТЕЙЩИК РОССИИ*. – 2020. – № 2. – С. 30–33.
9. Thermal Analysis of Cast Iron [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://www.heraeus.com/media/media/hen/media_hen/products_hen/iron/thermal_analysis_of_cast_iron.pdf (дата обращения 17.04.2021).
10. Cast iron / *L. Sofroni, I. Riposan, V. Brabie, M. Chisamera // Editura Didactica si Pedagogica Publisher*. – 1985. – Р. 36–49.
11. Выбор экзотермических углеродосодержащих добавок для регулирования режима охлаждения чугунных отливок / *Н. А. Кидалов, Н. И. Габельченко, А. А. Белов, А. И. Савченко // Черные металлы*. – 2020. – № 7 (1063). – С. 23–27.
12. Improvement of mechanical properties of iron castings via adjusting of solidification rate / *N. I. Gabelchenko, A. A. Belov, N. A. Kidalov, A. I. Gabelchenko // CIS Iron and Steel Review*. – 2020. – № 2. – С. 17–20. – DOI: 10.17580/cisirs.2020.02.04.
13. ГОСТ 2138-91. Пески формовочные. Общие технические условия (с поправкой). – Введ. 01.01.1993.
14. ГОСТ 28177-89. Глины формовочные бетонитовые. Общие технические условия. – Введ. 01.01.1991.
15. ГОСТ 10585-2013. Топливо нефтяное. Мазут. Технические условия. – Введ. 01.01.2015.
16. *Коваленко, В. С.* Металлографические реактивы : Справочник / *В. С. Коваленко*. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Metallurgia, 1981. – 121 с.
17. ГОСТ 3443-87. Отливки из чугуна с различной формой графита. Методы определения структуры. – Введ. 01.07.1988.