

УДК 519.677: 621.074

DOI:10.35211/1990-5297-2023-7-278-96-99

*С. Н. Цурихин¹, В. А. Гулевский², Н. Ю. Мирошкин¹, Н. А. Кидалов¹, Л. В. Бондаренко³***КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРЫ
И ФОРМЫ ВКЛЮЧЕНИЙ ГРАФИТА ЧУГУНА
СТАЛЕРАЗЛИВОЧНЫХ ИЗЛОЖНИЦ НА ИХ СТОЙКОСТЬ**¹Волгоградский государственный технический университет²Волгоградский индустриальный техникум³Государственное бюджетное общеобразовательное учреждение
города Москвы «Школа "Интеграл"»

e-mail: lp1@vstu.ru

Соппротивление чугунов разрушению во многом определяется формой графитовых включений, размером включений графита, количеством включений графита и характером распределения графитных включений. Исследования напряженно-деформированного состояния, выполненные на моделях из серого и модифицированного чугуна на изгиб, позволяют оценить преимущества и недостатки полученной структуры и формы включений графита. Применение метода математической статистики с получением эмпирической зависимости влияния структуры и формы включения графита чугуна на стойкость изложниц позволит оптимизировать химический состав чугуна и увеличить количество наливов. Применение в исследованиях метода аналитической статистики, такого как корреляционный анализ, выполненного на физических моделях из чугуна, позволило установить корреляционную зависимость влияния структуры и формы включений графита чугуна сталеразливочных изложниц на их стойкость.

Ключевые слова: серый чугун, химический состав, модифицирование, изложница, изгиб, деформация, математическая статистика, эмпирическая зависимость.

*S. N. Tsurikhin¹, V. A. Gulevsky², N. Y. Miroshkin¹, N. A. Kidalov¹, L. V. Bondarenko³***CORRELATION DEPENDENCE OF THE INFLUENCE OF THE STRUCTURE
AND SHAPE OF INCLUSIONS OF GRAPHITE CAST IRON
OF STEEL CASTING MILLS ON THEIR DURABILITY**¹Volgograd State Technical University²Volgograd Industrial College³State budgetary educational institution of the city of Moscow «School "Integral"»

The resistance of cast irons to destruction is largely determined by the shape of graphite inclusions, the size of graphite inclusions, the number of graphite inclusions, and the nature of the distribution of graphite inclusions. Studies of the stress-strain state, performed on models of gray and modified cast iron for bending, allow us to evaluate the advantages and disadvantages of the obtained structure and shape of graphite inclusions. The application of the method of mathematical statistics with obtaining an empirical dependence of the influence of the structure and form of the graphite inclusion of cast iron on the durability of the molds will allow optimizing the chemical composition of cast iron and increasing the number of fillings. The use of the method of analytical statistics in research, such as correlation analysis performed on physical models of cast iron, established the correlation dependence of the influence of the structure and shape of graphite inclusions of cast iron in steel casting molds on their durability.

Keywords: gray cast iron, chemical composition, modification, mold, bending, deformation, mathematical statistics, empirical dependence.

Введение

Структура металлов содержит множество фаз и является сложным объектом для описания ее строения. Микроструктура металлического материала определяется формой, размерами, относительным количеством и взаимным расположением кристаллов отдельных фаз или их совокупности, имеет однообразный вид. Из применяемых методов по распознаванию и классификации структур основным является

метод визуального оценивания, основанный на сравнении реального строения материалов с эталонными изображениями. Результат определения структуры основывается на сравнении микроструктуры исследуемого материала с эталонным изображением структуры. Данный подход является трудоемким и требует от специалиста-металловеда определенных навыков: усидчивости, терпения и умения сконцентрироваться на проводимых исследованиях.

Существуют многочисленные аналитические компьютеризованные комплексы, позволяющие распознавать изображение с применением методов числового описания геометрических параметров структуры. Для оценки взаимосвязи структуры и свойств, при использовании такого подхода, можно создавать и оптимизировать процессы производства чугуна с высокой корреляционной зависимостью.

Зависимость свойств серого чугуна от структуры значительно сложнее, чем у стали, так как его структура состоит из металлической основы и включений графита, вкрапленных в эту основу. Для характеристики структуры серого чугуна необходимо определить размеры, форму, распределение графита, а также структуру металлической основы.

Изучению стойкости чугунов с различной структурой металлической основы и формой графита в последнее время уделяется большое внимание, но единого мнения о механизме разрушения чугуна и влиянии формы графита на стойкость нет [1, 2].

Многократные повторения чрезвычайно интенсивных термических воздействий на изложницу как на конструкцию в целом, так и на материал – чугун, являются основными причинами ее разрушения и выхода из строя. Сопротивление чугунов разрушению при термоциклировании во многом определяется формой графитовых включений (ФГ), размером включений графита (РГ), количеством включений графита (КГ), и для повышения прочностных свойств предлагается модифицировать чугун. Исследователи считают, что наивысшей стойкостью обладает шаровидный графит (ШГ), а вермикулярный графит (ВГ) занимает промежуточное положение между пластинчатым графитом (ПГ) и ШГ [3]; другие отдают предпочтение ВГ [4, 5].

Применение модификатора вносит в характеристики структуры исследуемых чугунов изменения, влияющие на эксплуатационные свойства [6, 7, 8]. Использование и применение модификаторов основано на их эффективности, то есть способности модифицировать структуру серого чугуна (СЧ).

Применение компьютерного моделирования может существенно повысить представление о степени зависимости структуры и формы включения графита, влияющих на стойкость чугуна изложниц [9, 10].

Цель настоящей работы: установить корреляционную зависимость влияния структуры

и формы включений графита чугуна сталеразливочных изложниц по эксплуатационным и физико-механическим свойствам.

Методика проведения исследований

Выплавку чугуна проводили в индукционной печи марки ИСТ-006 емкостью 6 кг с кислотой футеровкой при доведении температуры металла до 1440 °С. Контроль температуры выполняли электронно-автоматическим потенциометром марки ЭПП-09Н с помощью термопары BP5/20. В качестве исходных шихтовых материалов использовали чугун следующего состава: 3,44 % С; 1,5 % Si; 0,7 % Mn; 0,080 % S; 0,075 % Р. При достижении заданной температуры металл выпускали в подогретый заранее ковш (10 кг), куда вводили присадку модификаторов, предварительно измельченную до фракции 0,5...2,0 мм. После обработки модификаторами скачивали шлак и заливали опытную форму в виде прутка диаметром 18 мм и длиной 120 мм.

Модификаторы были выбраны в соответствии с ТУ и ГОСТом ферросилиций ФС65 ГОСТ 1415–93; первичный алюминий А99 ГОСТ 11069–2001; ферросиликобарий ФСБ30 ТУ 14-5-160–2006; силикомишметалл СИМИШ-1 ТУ14-5-24–73; ванадиевый шлак ШВД-1 ТУ 14-11-178–86 [8, 11, 12]. Влияние модифицирования на трещиностойкость чугуна исследовали на установке [13]. Деформацию образца контролировали с помощью индикатора часового типа с точностью до 0,01 мм.

Образцы на трещиностойкость нагружали грузом $Q = 10$ кг, при нагреве проходящим током и выдержке $\tau = 12$ мин, периодичность отсчета показаний через каждую минуту. Максимальная температура нагрева образца на двенадцатой минуте составила $T = 920$ °С.

Металлографические исследования проводили на микроскопе OLYMPUS BX51M. Включения графита определяли на нетравленных шлифах. Металлическую основу изучали после травления микрошлифа. Для травления образцов на действительную структуру использовали 4%-й раствор азотной кислоты HNO_3 в этиловом спирте ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). Оценку структуры и графитных включений осуществляли по типовой шкале ГОСТ 3443–87.

Результаты исследования и их обсуждение

Влияние модифицирования на трещиностойкость исследовали при термоциклирова-

нии; материал склонен к необратимым формоизменениям, имеющим место при эксплуатации натуральных изложниц из чугуна. Выявлено, что при термоциклировании наиболее быстро падает трещиностойчивость у образца из обыкновенного СЧ.

Выражение $(l_2 - l_1) / l_2$ есть характеристика, которая свидетельствует о том, как раскрылась трещина в процессе термоциклирования (табл. 1).

Сложное напряженное состояние, возникающее при повторяющихся термоударах в физических моделях – изложнице, в наружных поверхностных слоях при изгибе стенок, вызывает наиболее опасное двухосное растяжение, резко снижающее ее конструкционную прочность. Термоциклирование исследуемых образцов приводит к росту включений графита и снижению трещиностойчивости.

Таблица 1

Влияние термоциклирования на рост трещины

Материал	$\sigma_{\text{опыт}}$, МПа	Длина трещины при термоциклировании		Относительное увеличение длины трещины $(l_2 - l_1) / l_2$
		начальная – l_1	конечная – l_2	
СЧ	48,14	55	100	0,45
СЧ+ФС65	49,25	33	56	0,41
СЧ+А99	66,1	16	27	0,40
СЧ+ШВД-1	58,16	25	32	0,22
СЧ+ФСБ30	64,29	11	12	0,08
СЧ+СИМИШ-1	68,29	14	15	0,07

С помощью методов математической статистики получена эмпирическая зависимость влияния напряжений, создаваемых при испытании образца, на длину трещины, выражающаяся уравнением регрессии:

$$L = -20,08\sigma_{\text{опыт}} + 137,33, \quad (1)$$

где L – длина трещины, мм; $\sigma_{\text{опыт}}$ – напряжение, создаваемое в образце при испытании. Эмпирический коэффициент корреляции ($R = -0,81$) свидетельствует о достаточно высокой степени связи между исследуемыми параметрами. Поэтому можно сделать важный вывод о том, что об эксплуатационных свойствах материала из-

ложниц можно судить, определяя предел прочности чугуна на изгиб.

Проведенный регрессионный анализ позволил установить корреляционную зависимость влияния структуры и формы графитовых включений в исследуемых чугунах на процесс трещинообразования. В соответствии с ГОСТ 3443–87 основными размерно-топологическими параметрами графитовой фазы в чугуне, оказывающими наиболее существенное влияние на механические и эксплуатационные свойства, являются: форма, размер, количество и распределение. Вводимые данные для обработки на ЭВМ представлены в табл. 2.

Таблица 2

Данные для расчета на персональном компьютере

Материал	Характеристика графита			
	КП	ФГ	РГ	КГ
СЧ	0,70	2	6 / 8 = 0,75	3 / 5 = 0,6
СЧ+ФС65	0,70	2	3 / 8 = 0,375	3 / 5 = 0,6
СЧ+А99	0,70	2	5 / 8 = 0,625	3 / 5 = 0,6
СЧ+ШВД-1	0,85	1	3 / 8 = 0,375	3 / 5 = 0,6
СЧ+ФСБ30	0,45	1	2 / 8 = 0,25	4 / 5 = 0,8
СЧ+СИМИШ-1	0,20	0	2 / 8 = 0,25	4 / 5 = 0,8

КП определялось по ГОСТ 3443–77 в долях, например: КП соответствует П70 – в таблицу

вносится 0,70. ФГ варьировалась на трех уровнях: 0 – шаровидная форма графита; 1 – вермикуляр-

ная форма графита; 2 – пластинчатая форма графита. РГ определяли как частное от деления; числитель дроби соответствует размеру графита в образце, а знаменатель – это количество оценок графита по ГОСТ 3443–77. КГ определяли тоже как частное от деления, где числитель соответ-

ствует количеству графита в образце, а знаменатель равен количеству оценок по ГОСТ.

Полученные зависимости характеризуются уравнениями множественной регрессии с соответствующим коэффициентом множественной корреляции:

$$I_1 = -87,145 + 125,312КП - 41,25ФГ + 53,88РГ + 112КГ \quad R = 0,81; \quad (2)$$

$$I_2 = -204,762 + 213,676КП - 67,5ФГ + 120,663РГ + 343КГ \quad R = 0,84. \quad (3)$$

По полученным зависимостям расчетных моделей проведены эксперименты, которые показали, что в соответствии с заданными критериями качества по уравнениям множественной

регрессии расчетные значения незначительно отличаются от экспериментальных значений (таблица 3), что подтверждает достаточно высокую степень связи исследуемых параметров.

Расчетные данные трещины

Таблица 3

Материал	Длина трещины при термоциклировании		Относительное увеличение длины трещины $(I_2 - I_1) / I_1$
	начальная – I_1	конечная – I_2	
СЧ	52	98	0,47
СЧ+ФС65	30	55	0,46
СЧ+А99	18	30	0,40
СЧ+ШВД-1	27	34	0,21
СЧ+ФСБ30	10	11	0,09
СЧ+СИМИШ-1	15	16	0,06

Вывод

С помощью методов математической статистики получена эмпирическая зависимость влияния напряжений, создаваемых при испытаниях образца на длину трещины. По расчетным регрессионным зависимостям установлена корреляционная зависимость влияния структуры и формы включений графита чугуна сталеразливочных изложниц на их стойкость, также получена связь между эксплуатационными свойствами материала изложниц и пределом прочности чугуна на изгиб.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бондаренко, С. И. Влияние формы графита на термическую стойкость чугуна / С. И. Бондаренко, И. П. Гладкий // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2006. – № 33. – С. 81–83.
2. Koch M., Soulas K. Inoculation of grey and ductile iron // 7 th International Ankiros Foundry Congress. Istanbul – 2014. – 21 p.
3. Riposan. Сопротивление окислению и термостойкость чугуна с различной формой графитных включений // 46 th International Foundry Congress. – 1984. – № 38. – С. 51–55.
4. Попов, П. И. Термостойкость чугунов с различной структурой металлической основы и графита / П. И. Попов // Металлургия. – 1983. – № 17. – С. 15–18.
5. Краевой, В. И. Повышение термической стойкости

чугуна / В. И. Краевой // Материаловедение в машиностроении. – 1983. – № 17. – С. 38–42.

6. Bex, T. Gray iron inoculation revisited // Modern Casting. – 1991. – P. 51–55.

7. Hummer R. Some aspects of inoculation of flake- and nodular graphite cast iron / The Metallurgy of Cast Iron // B. Lux, I. Minkoff, F. Mollars (eds.), St. Saphorin (Switzerland): Georgi Pub. Co. – 1975. – P. 147–160.

8. Болдырев, Д. А. Исследование комплексного влияния технологических параметров модифицирования конструкционных чугунов на показатели их структуры и свойств / Д. А. Болдырев // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева. – 2010. – № 4 (83). – С. 226–239.

9. Макаренко, К. В. Модель технологических процессов получения изделий из чугунов с заданными свойствами / К. В. Макаренко // Вестник машиностроения. – 2011. – № 6. – С. 55–60.

10. Advanced Computational Materials Modeling / Edited by Miguel Vaz Junior, Eduardo A. de Souza Neto, Pablo A. Munoz-Rojas. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. – 2011. – 432 p.

11. Исследование влияния модифицирования на эксплуатационные свойства чугуна изложниц / В. А. Гулевский, С. Н. Цурихин, В. В. Гулевский, Н. Ю. Мирошкин // Черные металлы. – 2021. – № 1. – С. 23–28.

12. Оценка влияния легирующих добавок на структуру и механические свойства серых чугунов / Д. А. Габец, А. М. Марков, А. В. Габец, Е. О. Чертовских // Ползуновский вестник. – 2018. – № 4. – С. 189–195.

13. Research of modification influence on cracking resistance of cast iron in moulds / В. А. Гулевский, С. Н. Цурихин, В. В. Гулевский, Н. Ю. Мирошкин // CIS Iron and Steel Review. – 2021. – Vol. 22, No. 2. – P. 9–14. – DOI: 10.17580/cisisr.2021.02.02.