А. А. Барон, Л. В. Палаткина

**О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НОВОГО ПАРАМЕТРА
ПЕРВИЧНОЙ СТРУКТУРЫ СЕРОГО ЧУГУНА
ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТИ ОТЛИВОК**

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: a_baron@mail.ru, lv.palatkina@yandex.ru

Исследована возможность оценки прочности перлитного серого чугуна с пластинчатым графитом по отношению площади междендритной эвтектической фазы к периметру дендритных кристаллов первичного аустенита. Установлено, что этот параметр увеличивается от 15,1 до 39,3 мкм по мере снижения предела прочности чугуна от 300 до 180 МПа. Коэффициент корреляции для этой зависимости составил 0,9.

Ключевые слова: серый чугун, объемная доля и периметр первичных дендритов, гидравлический диаметр междендритного пространства, ферритизация, бинаризация, прочность, твердость, тонкостенные отливки.

A. A. Baron, L. V. Palatkina

**ON THE POSSIBILITY OF APPLYING A NEW PARAMETER
OF THE PRIMARY STRUCTURE OF GRAY CAST IRON
TO EVALUATE THE STRENGTH OF CASTINGS**

Volgograd State Technical University

The possibility of evaluating the strength of pearlite gray cast iron with lamellar graphite using the ratio of the area of the interdendritic eutectic phase to the perimeter of the primary austenite dendritic crystals was investigated. It is found that this parameter increases from 15,1 to 39,3 as the ultimate tensile strength of cast iron decreases from 300 to 180 MPa. The correlation coefficient for this relationship was 0.9.

Keywords: grey cast iron, volume fraction and perimeter of primary dendrites, hydraulic diameter of the interdendritic space, ferritization, binarization, strength, hardness, thin-wall castings.

Введение

Серый чугун по-прежнему является одним из основных конструкционных материалов, применяемых в производстве тонкостенных корпусных отливок сложной геометрии. Это обусловлено не только экономической целесообразностью применения этого старейшего литейного сплава, но и уникальностью сочетания его технологических и эксплуатационных свойств. Поэтому поиск новых критериев оценки механических свойств серого чугуна без проведения дополнительных механических испытаний способствует совершенствованию методов оперативного контроля качества отливок в условиях производства и эксплуатации и остается одной из актуальных задач современного материаловедения. С практической точки зрения возможность прогнозирования величины прочности по единственному параметру микроструктуры позволяет отказаться от использования сложных расчетных зависимостей [1]. Поэтому преимущества такого подхода вдохновляют современных исследователей на дальнейшие работы в указанном направлении.

Традиционно прочность серого чугуна при растяжении (σ_B) сопоставляют с твердостью по Бринеллю HB [2, 3]. Корреляция этих параметров зависит от особенностей химического состава, микроструктуры, скорости охлаждения при кристаллизации и в твердом состоянии. Также различия напряженных состояний при определении твердости (объемное сжатие) и предела прочности (одноосное растяжение) на фоне значительного разнообразия видов графитовых включений и вторичных структур [4] приводят к большому разбросу данных при построении корреляционных зависимостей между σ_B и HB [5].

Ответственность первичной структуры (при рассмотрении чугуна как аналога компози-

онного материала, армированного дискретными волокнами) за основные качественные характеристики чугунных отливок была отмечена в работах зарубежных и отечественных исследователей [6, 7, 8]. Более поздние работы в этом направлении [9, 10] не только подтвердили правомерность композиционного подхода, но и показали, что оценка прочности серого чугуна по объемной доле дендритов первичного аустенита (f_{DK}) существенно точнее, чем по твердости [11]. В работах [12, 13] был предложен новый параметр первичной структуры чугуна - гидравлический диаметр междендритного пространства (D_{IP}^{Hyd}), и показана его взаимосвязь с пределом прочности серого доэвтектического чугуна.

Многообразие факторов, влияющих на прочность серого чугуна, делает крайне сложной задачу расчетной количественной оценки временного сопротивления. Многие из них оказывают противоположное влияние на предел прочности. Однако несомненно то, что в итоге после застывания этого кипящего клубка противоречий формируется первичная структура, которая и определяет прочность готового материала.

Цель данной работы заключалась в анализе эффективности использования нового параметра первичной структуры D_{IP}^{Hyd} для повышения точности экспресс-контроля качества чугунных отливок, основанного на металлографической оценке первичной структуры.

Материалы и методы исследования

Разработанная методика предусматривала сравнительный анализ результатов количественной оценки прочности серого чугуна по параметрам первичной структуры (f_{DK} и D_{IP}^{Hyd}). Для этого использовались серые чугуны, полученные ваграночным способом по штатной технологии в производственных условиях литейного цеха (табл. 1).

Таблица 1

Механические свойства и химический состав исследуемых композиций чугуна

№	Предел прочности σ_B , МПа	Твердость по Бринеллю HB	Содержание основных элементов, % масс		
			C	Si	Mn
1	180	182	3,26	0,95	1,48
2	215	207	3,05	0,67	1,55
3	255	229	3,14	0,64	1,90
4	268	229	3,01	0,87	2,24
5	285	229	2,98	0,68	1,70
6	290	229	2,9	0,79	2,14
7	300	229	3,1	0,66	2,29

Выборку образцов производили непрерывно, в течение трех месяцев. Основными критериями при отборе композиций чугуна были:

- малые отличия в параметрах вторичной структуры, графитовой фазы;
- различные значения механических свойств (σ_B и HV) и различное количество в объеме образцов дендритных кристаллов первичного аустенита.

Стандартные разрывные образцы были выполнены по ГОСТ 24648-90 [14]. Заготовки для них в виде стержней $\varnothing 30$ мм отливали в сырую песчано-глинистую форму. Металлографические шлифы готовились обычным способом из материала разрушенных половинок испытанных разрывных образцов. Осуществляли просмотр всей поверхности шлифа путем перемещения предметного столика микроскопа с исследуемым образцом и выбирали для анализа в плоскости шлифа наиболее типичные 3–5 полей зрения. Оценка структуры проводилась в соответствии с требованиями ГОСТ 3443–87 [4]. Для выявления вторичной структуры металлической основы проводили кратковременное травление в 4 % спиртовом растворе HNO_3 .

Количественные металлографические исследования определения f_{DK} выполняли методом секущих на микроскопе МЕТАМ ЛВ-41, при увеличении 100. Дендритные кристаллы первичного аустенита выявлялись с помощью

кратковременного (6–10 с) травления в смеси борной (10–30 г) и серной (объем 100 мл) кислот, чередующегося с промывкой шлифа в проточной воде и его переполитировкой.

В работах [12, 13] авторы, опираясь на стереологические исследования [15], показали, что для расчета D_{IP}^{Hyd} можно использовать как трехмерные, так и двумерные параметры микроструктуры:

$$D_{IP}^{Hyd} = V_{IP}/S_{\gamma} = A_{IP}/P_{\gamma}, \quad (1)$$

где S_{γ} и P_{γ} – площадь поверхности первичного аустенита в объеме и периметр первичного аустенита в плоскости шлифа; V_{IP} и A_{IP} – суммарный объем и общая площадь междендритной фазы.

В настоящей работе параметр первичной структуры чугуна, который выражает масштаб длины междендритной фазы – D_{IP}^{Hyd} рассчитывали, как отношение площади эвтектики A_{IP} , мкм^2 , между дендритами к периметру дендритных кристаллов первичного аустенита P_{γ} , мкм .

С целью автоматического измерения параметров первичной структуры использовали растровый программный пакет Adobe Photoshop CS5 и специализированный пакет для анализа изображений ImageJ. Перед осуществлением измерений фотографии микроструктур подвергались бинаризации (рис. 1) – переводу исходного полутонового изображения в градациях серого в двухцветное черно-белое.

Рис. 1. Характерный пример дендритных кристаллов первичного аустенита на образцах, $\times 100$:
а – исходные фотографии; б – подвергнутые бинаризации

При этом получали четко видимую границу раздела металлической основы (эвтектики) и дендритов первичного аустенита. Однако в отдельных случаях возникали сложности идентификации границ областей дендритов и эвтектики при бинаризации изображений. Поэтому нами была разработана методика предварительной подготовки образцов с целью получения максимальной достоверности результа-

тов металлографических исследований и последующей их бинаризации.

С этой целью использовались особенности микроликвационного распределения элементов при кристаллизации чугуна (прямая ликвация углерода в жидкую фазу при одновременном вытеснении его из дендритов первичного аустенита ликвирующим в них кремнием [16]) и их последующее влияние на вторичную струк-

туру. Суть этого влияния состоит в том, что при технологических или эксплуатационных нагревах в области ниже критических температур возникают термодинамические условия для образования в дендритах преимущественно феррита. На указанной основе были рассчитаны температуры нагрева, провоцирующие процессы ферритизации. В работе [17] мы показали, что нагрев образцов при температурах, максимально приближенных к субкритическим, провоцирует ферритизацию дендритных ветвей. При этом перлит сохраняется в металлической основе эвтектических ячеек.

Критическую температуру начала аустенизации металлической основы чугуна (A_{C1}) рассчитали для каждого состава по эмпирической формуле [17, 18]:

$$A_{C1} = 730 + 28 \cdot (\% \text{ Si}) - 25 \cdot (\% \text{ Mn}), \quad (2)$$

Время выдержки образца составляло 1 ч с последующим охлаждением на спокойном воздухе в тигле. Для предотвращения обезуглероживания, образцы, перед загрузкой в печь, обрабатывали в насыщенном водном растворе медного купороса, а при нагреве дополнительно защищали, помещая их в тигель с порошкообразным графитом.

Результаты и их обсуждение

Результаты количественной оценки структуры исследуемых композиций чугуна представлены в табл. 2.

Несмотря на практически одинаковые характеристики включений графита и отсутствие феррита в исследуемых чугунах разной прочности количество дендритов первичного аустенита, и гидравлический диаметр междендритного пространства значительно изменяются.

Таблица 2

Параметры структуры чугунов

№	Графитовая фаза по ГОСТ 3443-87	Площадь, занятая пластинчатым перлитом, % по ГОСТ 3443-87*	Гидравлический диаметр междендритного пространства (D_{IP}^{Hyd}), мкм	Объемная доля дендритных кристаллов f_{DK} , %
1	*ПГд45	94	39,3	18
2	ПГд90	94	25,0	44
3	ПГд90	98	18,7	49
4	ПГд45	98	22,2	51
5	ПГд45	98	15,1	54
6	ПГд90	98	17,9	59
7	ПГд45	98	16,9	61

*длина включений пластинчатого графита (с равномерным распределением) ПГд45 от 30 до 60 мкм и ПГд90 от 60 до 120 мкм с общим количеством от 3 до 8 % по площади.

Результаты исследования взаимосвязи между прочностью чугуна и параметром D_{IP}^{Hyd} представлены на рис. 2. Они свидетельствуют о наличии связи между указанными величинами. Представленная зависимость аппроксимирована степенной функцией:

$$\sigma_B = 1362,8 D_{IP}^{Hyd -0,554}. \quad (3)$$

Рис. 2. Зависимость предела прочности σ_B от D_{IP}^{Hyd}

На графике рис. 3 представлена зависимость предела прочности от f_{DK} для исследуемых композиций чугуна.

Рис. 3. Зависимость предела прочности σ_B исследованного чугуна от объемной доли кристаллов первичного аустенита f_{DK}

Эту зависимость можно аппроксимировать многочленом

$$\sigma_B = 0,0624 f_{DK}^2 - 1,9255 f_{DK} + 192,62. \quad (4)$$

На рис. 4 представлена зависимость между объемной долей дендритных кристаллов первичного аустенита f_{DK} , % и параметром D_{IP}^{Hyd} , мкм. Связь между данными величинами можно аппроксимировать уравнением прямой линии:

$$f_{DK} = -1,6778 D_{IP}^{Hyd} + 85,184. \quad (5)$$

Высокий коэффициент корреляции 0,96 между этими характеристиками говорит о практической равноценности использования D_{IP}^{Hyd} и f_{DK} для расчетного прогнозирования прочности исследованного серого чугуна с точки зрения точности получаемых результатов. Поскольку D_{IP}^{Hyd} требует предварительного расчета, это приводит к усложнению процедуры оценки прочности. С той же степенью достоверности, но несколько проще, можно рассчитать предел прочности непосредственно по величине f_{DK} , как это ранее предлагалось в наших работах [8, 9].

Рис. 4. Зависимость между объемной долей первичного аустенита и параметром D_{IP}^{Hyd}

Видно, что использование параметра D_{IP}^{Hyd} для рассматриваемых чугунов с целью оценки

их предела прочности не дает ощутимых преимуществ по сравнению с объемной долей первичного аустенита f_{DK} .

На рис. 5 представлены результаты расчета значений σ_B по величинам D_{IP}^{Hyd} и f_{DK} .

Рис. 5. Сравнительный анализ точности методов расчетной оценки предела прочности серого чугуна: ряд 1 – расчет по D_{IP}^{Hyd} ; ряд 2 – расчет по f_{DK}

Данные рядов 1 и 2 рис. 5 аппроксимированы соответственно уравнениями (6) и (7).

$$\sigma_B = 0,8446 D_{IP}^{Hyd} + 39,567 \quad (6)$$

$$\sigma_B = 0,9237 f_{DK} + 19,588 \quad (7)$$

Видно, что свободный член в уравнении (7) вдвое меньше, чем в уравнении (6). Это может свидетельствовать о несколько более высокой точности зависимости (7), так как при совпадении экспериментальных и расчетных значений σ_B прямая линия проходит через начало координат под углом 45° к каждой оси, и свободный член равен нулю. Результаты анализа точности расчетов, приведенные в табл. 3, подтверждают данный вывод, хотя значительных преимуществ это не дает.

Таблица 3

Анализ точности оценки предела прочности

№	Предел прочности σ_B , МПа	Расчетные значения σ_B , МПа		Относительная погрешность Δ , %	
		по D_{IP}^{Hyd}	по f_{DK}	по D_{IP}^{Hyd}	по f_{DK}
1	180	178,3	178,2	-0,9	-1,0
2	207	229,4	228,7	10,8	10,5
3	255	268,9	248,1	5,4	-2,7
4	268	244,7	256,7	-8,7	-4,2
5	285	302,7	270,6	6,2	-5,1
6	290	276,1	296,2	-4,8	2,1
7	300	284,6	307,4	-5,1	2,4

Заключение

Проведенный в данной работе сравнительный анализ двух характеристик первичной структуры (D_{IP}^{Hyd} , f_{DK}) показал их взаимозаменяемость и возможность применения при расчетной оценке прочности доэвтектических серых чугунов. Показано, что использование параметра D_{IP}^{Hyd} для рассматриваемых чугунов с целью оценки их предела прочности не дает серьезных преимуществ по сравнению с объемной долей первичного аустенита f_{DK} . Однако, на наш взгляд, известное усложнение процедуры оценки прочности с использованием гидравлического диаметра междендритного пространства может ограничить его широкое распространение на практике. Дополнение полученных в данной работе результатов за счет исследований на других чугунах и дальнейшее накопление экспериментальных данных несомненно позволят ответить на этот вопрос.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ruff G. F. Effects of solidification structure on the tensile properties of lamellar iron / G. F. Ruff, J. F. Wallace // AFS Transactions 56 (1977) 179-202.
2. Чугун: справочник / под ред. А. Д. Шермана, А. А. Жукова. – М.: Металлургия, 1991. – 576 с.
3. Материалы в машиностроении. Выбор и применение. В 8 т. Т. 4. Чугун; под ред. А. А. Жукова, А. Д. Шермана. – М.: Машиностроение, 1969. – 248 с.
4. ГОСТ 3443–87. Отливки из чугуна с различной формой графита. Методы определения структуры. – М.: Стандартинформ, 2005. – 42 с.
5. Барон, А. А. Влияние параметров структуры серого чугуна на твердость и прочность отливок / А. А. Барон, Л. В. Палаткина // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 15 (194) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2016. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 106–109.
6. Паттерсон, В. Микроструктура чугуна и его свойства / В. Паттерсон // 29-й Международный конгресс литейщиков. – М.: Машиностроение, 1967. – С. 55–63.
7. Эллиотт, Р. Управление эвтектическим затвердеванием / Р. Эллиотт. Перевод: Б. Б. Страумал. Научный редактор: Л. С. Швиндлерман. – Москва : Металлургия. – 1987. – 352 с.
8. Ильинский, В. А. О композитном характере структуры кристаллизации чугунов с различной степенью эвтектичности / В. А. Ильинский, Л. В. Костылева // Изв. АН СССР. Металлы. – 1986. – № 5. – С. 116–118.
9. Барон, А. А. Дендритная структура серого чугуна и ее влияние на механические свойства отливок / А. А. Барон, Л. В. Палаткина // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 6 (201) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2017. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 114–119.
10. Барон, А. А. Исследование соотношения твердости и прочности серых чугунов с учетом параметров структуры / А. А. Барон, Л. В. Палаткина // Металлы. – 2017. – № 6. – С. 93–98.
11. Барон, А. А. О расчетном прогнозировании прочности серого чугуна / А. А. Барон, Л. В. Палаткина // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 3 (213) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2018. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 91–94.
12. Fourlakidis, V. Dendritic morphology and ultimate tensile strength of pearlitic la-mellar graphite iron: PhD dissertation. Jönköping University, School of Engineering, Jönköping, 2019. Retrieved from <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:hj:diva-43228>
13. Fourlakidis, V. Generic Model to Predict the Ultimate Tensile Strength in Pearlitic Lamellar Graphite Iron. / V. Fourlakidis, A. Diószegi. A // Materials Science and Engineering A 618:161–167 September 2014.
14. ГОСТ 24648–90 Чугун для отливок. Отбор проб и изготовление образцов для механических испытаний. – М.: Издательство стандартов, 2004. – 9 с.
15. Салтыков, С. А. Стереометрическая металлография / С. А. Салтыков. – М.: Металлургия, 1976. – 271 с.
16. Ильинский, В. А. Закономерности микроликвации в железоуглеродистых сплавах и новые возможности литейной технологии / В. А. Ильинский, А. А. Жуков, Л. В. Костылева // Международный конгресс литейщиков МКЛ - 55. – М., 1988. – С. 1–11.
17. Барон, А. А. Структурные изменения при нагреве в дендритных кристаллах серого чугуна / А. А. Барон, Л. В. Палаткина, М. С. Таранова, Д. Н. Гурулев // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 2 (237) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2020. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 76–80.
18. Машиностроение. Энциклопедический справочник. Технология производства машин. Р.3 Т.7 / под. ред. В. М. Кована. – М.: МАШГИЗ, 1949 – 728 с.