

УДК 669.13:519.873

К.В. Макаренко

**ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕРНО-ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГРАФИТОВОЙ ФАЗЫ С ЦЕЛЮ ПОВЫШЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЧУГУНОВ**

Брянский государственный технический университет

Представлена методика оптимизации структуры графитизированных чугунов с целью обеспечения в изделиях высокого уровня механических и эксплуатационных свойств. Методика основана на компьютерном моделировании структуры чугуна, при котором сочетание графитовой фазы и металлической матрицы рассматривается с позиции механики композиционных материалов. В статье представлены результаты использования методики для решения задачи повышения уровня прочностных свойств изделий из чугунов с шаровидным графитом.

*Ключевые слова:* чугун, графит, структура, моделирование, разрушение, механические свойства, прочность.

**Введение**

За рубежом последнее время широкое развитие получают методы компьютерного материаловедения, которые связывают в единую систему состав сплава, структуру, свойства и технологию [1, 2]. Наименее изученным в этой цепочке является звено структура → свойства, т.к. большинство предлагаемых компьютерных моделей строения материалов являются в значительной степени идеализированными, что часто приводит к неадекватным результатам сравнительной оценки экспериментальных и расчетных данных.

В отечественной металлографии применяется метод, в соответствии с которым структура конструкционных сплавов рассматривается с позиции строения композиционных материалов [3]. При таком подходе отдельные фазы и структурные составляющие, формирующие структуру сплава, обладают индивидуальными физико-механическими свойствами и размерно-топологическими характеристиками. Использование современных методов анализа микроструктуры материалов позволяет определить размерно-топологические характеристики отдельных фаз и составляющих структуры, а присваивание им соответствующих свойств и атрибутов позволяет, получить довольно точную компьютерную модель структуры сплава.

Размерно-топологические параметры структуры чугуна, такие как размер, форма, количество и распределение, характеризующие графитовую фазу, оказывают значительное влияние на свойства материала. Однако определение этих параметров в соответствии с методикой, представленной в ГОСТ 3443-87, в значительной степени зависит от человеческого фактора. Использование результатов такого анализа не позволяет создавать адекватные математические модели для оценки взаимосвязей структура – свойства. Широкое внедрение современных систем для компьютерного анализа структур материалов диктует новые требования к способам математического описания строения чугуна.

Большое разнообразие фаз и структурных составляющих металлической основы чугунов позволяет получать структуры с различной морфологией, обеспечивающей широкий диапазон механических и эксплуатационных характеристик. Наиболее высокими прочностными свойствами в настоящее время обладают чугуны с шаровидным графитом и аусферритной металлической матрицей [4].

**Теоретический анализ**

Изменение структуры чугуна в ходе реализации различных технологических операций происходят за счет протекания фазовых переходов. Оказывать воздействие на развитие процессов структурообразования можно за счет нескольких основных управляющих факторов, таких как легирование, модифицирование и скорость охлаждения.

С позиции теории систем процесс структурообразования чугуна можно рассматривать как динамическую систему, которая под воздействием управляющих факторов совершает движение из одного структурного состояния в другое. Структура определяет конечные свойства изделий из чугуна.

С позиции оценки внутренних процессов, протекающих в системе, они характеризуют изменение структуры под воздействием различных факторов и описываются фазовым составом  $\sum R_s$ , а также размерно-топологическими параметрами структуры чугуна  $D_l$ :

$$P(\tau) = f \left[ \sum R_s(D_l), \tau \right], \quad (1)$$

где  $\tau$  - время;  $P(\tau)$  - функция, которая описывает внутреннее состояние системы в определенный момент времени. Функция  $P(\tau)$  определяет закономерность происходящих событий при структурообразовании чугуна. Под событием подразумевается всякое структурное изменение состояния системы «чугун».

Изменения, происходящие в системе, можно оценить путем сравнения векторов, характеризующих развитие структурных превращений в различные моменты времени (в начальный  $\tau$  и последующие  $\tau + \varepsilon$  ( $\varepsilon > 0$ )).

Фазовый состав  $\sum R_s$  представлен синтезом различных фаз, которые присутствуют в определенный момент в чугуне. Размерно-топологический фактор  $D_l$  [3] определяется следующими характеристиками: характером взаимопроникновения фаз; относительным объемом; формой фаз; степенью их дисперсности; взаимной кристаллографической ориентацией фазовых выделений.

С позиции разработки эффективной стратегии управления процессами структурообразования необходимо, чтобы каждое последующее движение приближало систему к оптимальной заданной конечной структуре  $Y(\tau_k)$ :

$$\lim_{\tau \rightarrow \tau_k} P(\tau) = Y(\tau_k), \quad (2)$$

где  $\tau_k$  – время, характеризующее конечную структуру чугуна, определяющую заданный уровень свойств чугуна в изделии.

Оптимизация конечной структуры  $Y(\tau_k)$ , с учетом выражения (2), в момент ввода изделия в эксплуатацию производится в соответствии с определенными критериями по схеме

$$Y(\tau_k) \rightarrow \max \sigma_i, \quad (3)$$

где  $\sigma_i$  – критерий оптимизации, характеризующий определенное свойство.

В случае многокритериальной оптимизации выражение (3) примет вид

$$Y(\tau_k) \rightarrow \max \sigma_i, \min \varphi_j \dots \quad (4)$$

Помимо классической схемы оптимизации структуры чугуна, в рамках предлагаемого подхода могут быть реализованы и другие способы. Во-первых, при использовании стохастических методов оптимизации могут быть определены размерно-топологические параметры структурных составляющих нового типа чугуна, которые при оптимальном сочетании обеспечивают требуемый уровень свойств. Такой способ оптимизации может быть использован при разработке новых материалов, обладающих уникальными сочетаниями свойств. Во-вторых, с помощью процесса моделирования можно выявить наиболее слабые участки или элементы в структуре чугуна, которые оказывают негативное влияние на его свойства.

### Экспериментальная часть

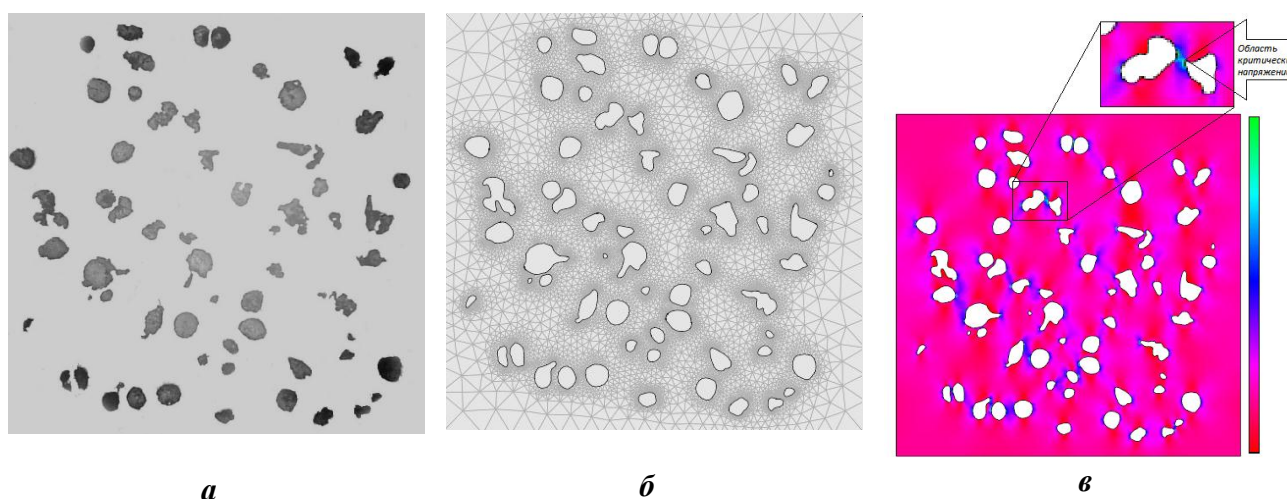
Проведем моделирование и оптимизацию структуры высокопрочного чугуна с шаровидным графитом с целью обеспечения максимально возможного уровня прочностных свойств в изделиях.

Процесс оптимизации реализуется путем выявления ослабленных участков микроструктуры при моделировании испытаний для определения механических свойств материала. Теоретической основой оптимизации является компьютерный анализ изображения

микроструктуры в плоском напряженном состоянии с начальными условиями статического испытания упругопластического материала. Общая последовательность этапов моделирования структуры представлена в работе [5].

Первоначально обрабатываются фотографии микроструктуры высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, который на данный момент характеризуются наиболее высокими прочностными свойствами в классе графитизированных чугунов. Анализ производится с целью определения влияния графитовых включений на прочностные характеристики чугуна. Для этого используем реальную микроструктуру высокопрочного чугуна (рис. 1, а). Далее, в соответствии с разработанным алгоритмом оптимизации, проводится идентификация графитовой фазы на изображении микроструктуры.

С учетом разупрочняющего воздействия, которое оказывают графитовые включения на механические свойства чугуна, являясь концентраторами напряжений в металлической матрице, получаем компьютерную модель микроструктуры, в которой графитовая фаза замещается перфорацией по форме, соответствующей конфигурации графитовых включений. После обработки изображения программными средствами металлическая матрица заменяется сеткой конечных элементов, при этом ей присваиваются свойства и атрибуты армо-железа, которые характерны для ферритной структуры чугуна (рис. 2, б). Полученная 2D-модель структуры чугуна подвергается моделированию испытаний на растяжение. В результате таких виртуальных испытаний микроструктуры чугуна получаем изображение, демонстрирующее распределение полей напряжений в плоском напряженном состоянии (рис. 2, в).



**Рис. 1. Этапы моделирования структуры высокопрочного чугуна с шаровидным графитом:**  
 а – исходная микроструктура (не травлено),  $\times 100$ ; б – компьютерная модель исходной структуры;  
 в – напряженное состояние модели исходной структуры

Для анализа оптимизации прочностных характеристик традиционно используется критерий главного критического напряжения, который позволяет оценить склонность материала к разрушению при одноосном растяжении:

$$\sigma_1 = \sigma_T, \quad (5)$$

где  $\sigma_1$  – максимальное главное напряжение;  $\sigma_T$  – предел текучести матрицы.

В соответствии с этим критерием, разрушение материала происходит при достижении главным напряжением критического значения, равного пределу текучести при одноосном растяжении. Для более сложных испытаний и различных типов строения материалов могут быть использованы другие критерии, например, максимальной деформации, фон Мизеса, Цяя-Хилла, Галилея-Ренкина, Кулона, Мора и др. [6].

Для оценки предела прочности группы сплавов, в которых деформация реализуется преимущественно путем сдвига, используем критерий фон Мизеса. С учетом того, что ис-

следует 2D-модель структуры, критерий определяется следующим уравнением:

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2 = \sigma_T^2 \quad (6)$$

где  $\sigma_1, \sigma_2$  – критические напряжения в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Динамическое состояние структуры материала  $P(\tau)$  в общем случае может быть представлено уравнением (1).

С учетом представления структуры чугуна как композиционного материала, состоящего из графитовой фазы ( $Гр$ ) и металлической матрицы ( $М.м.$ ), уравнение (1) можно представить в следующем виде:

$$P(\tau_k) = f \left[ Гр(D_\beta, A_{gp}, S_{gp}, \Lambda), М.м.(D_{М.м.}), \tau \right], \quad (7)$$

где параметры графитовой фазы:  $D_\beta$  – средняя фрактальная размерность, которая характеризует форму включений;  $A_{gp}$  – средняя площадь включения, геометрический аналог его размера;  $S_{gp}$  – площадь, занимаемая графитовой фазой на изображении, используется для определения количества графита в чугуне;  $\Lambda$  – лакуарность, которая характеризует неоднородность заполнения бинарного изображения микроструктуры чугуна пикселями, относящимися к графитовой фазе, используется для описания распределения;  $D_{М.м.}$  – размерно-топологические параметры металлической матрицы. Более подробно с методикой расчета соответствующих параметров, характеризующих размерно-топологические характеристики графитовой фазы в чугунах, можно ознакомиться в работе [7].

К размерно-топологическим параметрам металлической матрицы относятся следующие характеристики: количество фаз; характер их взаимопроникновения; форма включений; степень дисперсности; относительный объем; взаимная кристаллографическая ориентация фазовых выделений и т.п. В первом приближении, матрицу чугуна можно представить как однородную фазу, при этом ее параметры сводятся к объему, который, при анализе плоского изображения микроструктуры, может быть определен как остаточная площадь:

$$S_{М.м.} = 1 - S_{gp}. \quad (8)$$

С точки зрения разработки эффективной стратегии управления процессами структурообразования, в чугунах необходимо, чтобы технологические факторы, дополнительно включаемые в существующий технологический процесс, приближали чугун к оптимальной структуре  $Y(\tau_k)$ :

$$\lim_{\tau \rightarrow \tau_k} P(\tau) = Y(\tau_k). \quad (9)$$

Исходя из критерия оптимизация (6), максимальные прочностные свойства в чугуне при оптимизированных параметрах графитовой фазы будут определяться физико-механическими характеристиками металлической матрицы, в частности значениями  $\sigma_T$ .

С учетом основной цели моделирования – повышения прочностных характеристик изделия из графитизированного чугуна перед вводом его в эксплуатацию  $P(\tau_k)$  – процесс оптимизации структуры может быть представлен в виде следующего уравнения:

$$f \left[ Гр(D_\beta, A_{gp}, S_{gp}, \Lambda), М.м., \tau_k \right] = \max(\sigma_T). \quad (10)$$

При оптимизации структуры материала данным способом используется принцип оптимальности Р. Беллмана [8], в соответствии с которым оптимальная технологическая стратегия обладает следующим свойством: каково бы ни было начальное состояние структуры чугуна  $P(\tau_l)$  и первоначальная технология его производства, последующая стратегия должна изменять модель структуры чугуна таким образом, чтобы обеспечивать повышение его прочности. Достижение максимума прочностных характеристик при моделировании структуры чугуна соответствует оптимальному соотношению параметров графитовой фазы и получению  $Y(\tau_k)$ .

Анализ изображения плоского напряженного состояния позволил выявить части структуры материала, в которых, в соответствии с критерием (6), может произойти разрушение металлической матрицы (рис. 1, в).

Причины ослабления матрицы следующие: образование цепочек, состоящих из графитовых включений, отклонение их от идеальной сферической формы и значительные различия в размерах соседних включений. При этом размерный фактор оказывает наиболее существенное влияние. Графитовые включения, имеющие преобладающие размеры в сплаве, являются наиболее опасными концентраторами напряжений. Неравномерное распределение графитовой фазы, которое привело к образованию цепочек включений, связано с первичной кристаллизацией дендритов аустенита в доэвтектическом чугуна. В этом случае эвтектический графит, кристаллизующийся в последнюю очередь, располагается между дендритами, образуя кластерные цепочки, состоящие из нескольких включений. Анормальность формы графитовых включений в высокопрочном чугуна объясняется пониженным содержанием остаточной концентрации Mg после сфероидизирующего модифицирования.

Таким образом, оптимальная структура чугуна, которая обеспечивает изделиям высокие прочностные свойства, должна быть представлена включениями графитовой фазы одинакового (минимального) размера, идеальной сферической формы и равномерно распределенными в объеме материала.

Для оптимизации структуры чугуна с целью устранения возможных причин, приводящие к ослаблению металлической матрицы, производится совершенствование технологии, обеспечивающей получение требуемой структуры. При этом руководствуемся данными взаимосвязи управляющих факторов технологического процесса с параметрами графитовой фазы [9]. Результаты системного анализа, представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Взаимосвязь параметров графитовой фазы с технологическими факторами, оказывающими влияние на ее формирование при кристаллизации чугуна**

Морфологический параметр графитовой фазы	Геометрическая характеристика, характеризующая параметр, условное обозначение	Технологические факторы, влияющие на формирование параметров графита при кристаллизации чугуна
1	2	3
Форма	Средняя фрактальная размерность включений, $D_{\beta}$	Остаточное содержание Mg, Ce, S, Ti и др. элементов в чугуна
		Продолжительность выдержки расплава после сфероидизирующего модифицирования
		Технология модифицирования
		Масса отливки
Размер	Средняя площадь включений, $A_{sp}$ , пкс.	Качество шихтовых материалов
		Содержание C, Si, Cu в чугуна
		Технология получения отливки
		Технология инокулирующего модифицирования
		Качество шихтовых материалов
		Величина переохлаждения и скорость охлаждения в период графитообразования
		Масса отливки
Количество	Содержание графитовой фазы на изображении, $S_{sp}$ , %	Требуемая металлическая матрица
		Содержание углерода в чугуна
		Технология инокулирующего модифицирования
		Степень эвтектичности расплава
		Качество исходных шихтовых материалов
		Перегрев расплава в печи
		Величина переохлаждения и скорость охлаждения в период графитообразования

Окончание табл. 1

1	2	3
		Технологии энергетического воздействия на расплав: вибрация, ультразвук, эл. ток
Распределение	Лакунарность изображения, $\Lambda$	Степень эвтектичности расплава
		Технология инокулирующего модифицирования
		Величина переохлаждения и скорость охлаждения в период графитообразования
		Конфигурация и масса отливки
		Технологии энергетического воздействия на расплав: вибрация, ультразвук, эл. ток

### Результаты

В усовершенствованном технологическом процессе для обеспечения оптимальных параметров структуры использовали чугун эвтектического состава. Для получения мелкодисперсной равномерно распределенной графитовой фазы в образцах из высокопрочного чугуна использовали технологию «синергетического» модифицирования [10]. Для устранения «наследственных» свойств чугунов производили перегрев расплава в сочетании с низкотемпературным двухступенчатым модифицированием, включающим сфероидизирующую и вторичную инокулирующую обработку расплава.

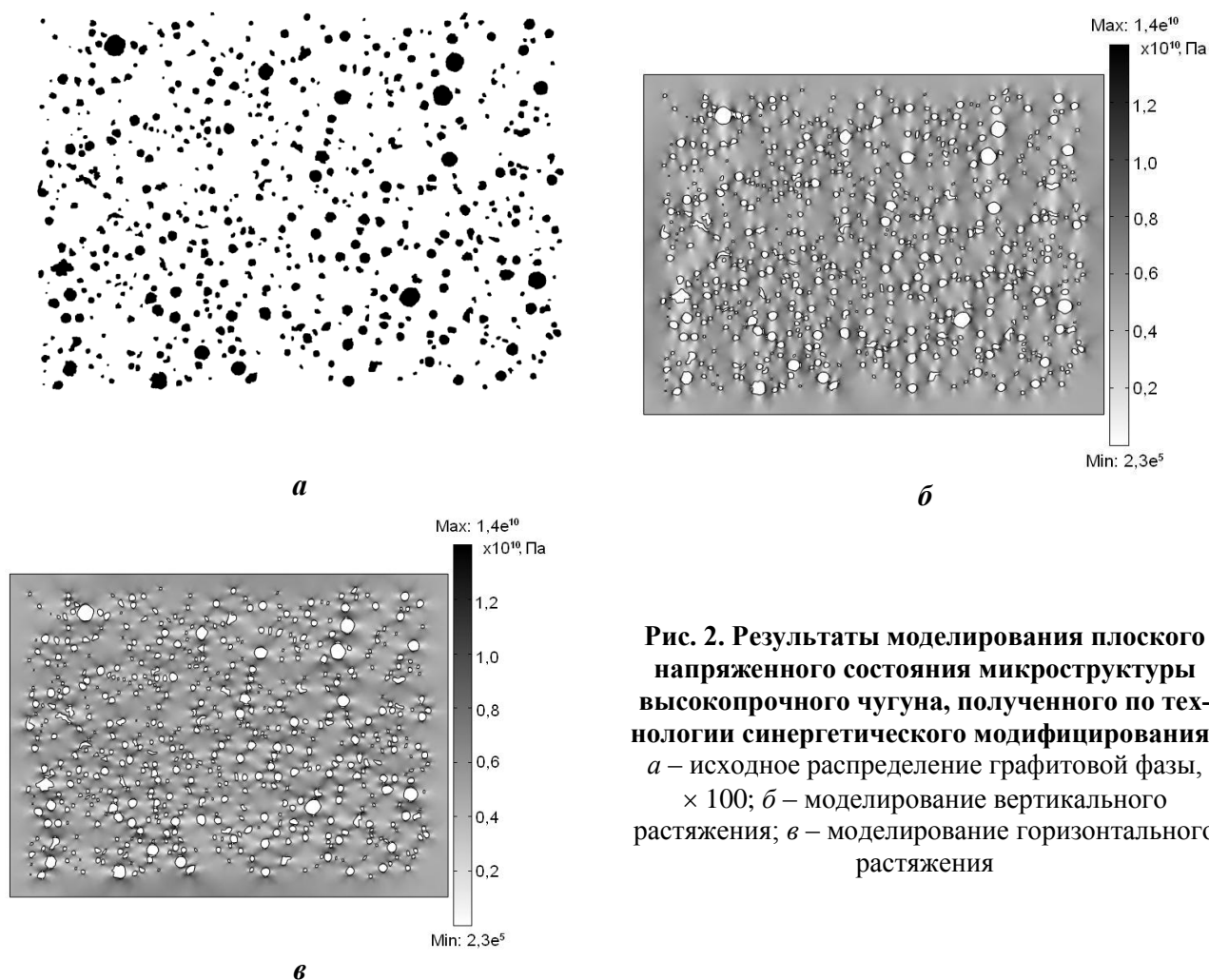
Результаты моделирования при плоском напряженном состоянии изображения микроструктуры высокопрочного чугуна с мелкодисперсной графитной фазой представлены на рис. 2. Химический состав исследованного чугуна с мелкодисперсным графитом, в % мас.: 3,2 C; 3,5 Si; 0,25 Mn; 0,5 Cu; 0,028 P; 0,013 S; 0,04 Mg.

Графитовая фаза в металлической матрице чугуна распределена равномерно, несмотря на то, что в отдельных областях наблюдаются цепочки, представленные кластерами графитовых включений (рис. 2, а). Особенно четко они проявляются в системе распределения линий пластической деформации. При изменении направления приложения нагрузки (рис. 2, в) возникают участки критических напряжений, которые в совокупности с цепочками графитовых включений образуют линии, по которым образуется трещина.

В структуре чугуна преобладают графитовые включения шаровидной и компактной формы, которые в меньшей степени, чем пластинчатый или вермикулярный графит, разупрочняют металлическую матрицу. Отдельные крупные включения шаровидной формы, встречающиеся в матрице чугуна, оказывают существенное влияние на процессы возникновения критических полей напряжений. В том случае, если направление приложения нагрузки к модели ориентировано по отношению к близлежащим мелким включениям графита, крупное включение способствует развитию критических напряжений в матрице чугуна (см. левый верхний угол рис. 2, б). Если в направлении приложения нагрузки около крупного графитового сфероида отсутствуют мелкие включения, его влияние на генерацию пиковых напряжений снижается.

При моделировании структуры графитизированного чугуна, полученной по технологии «синергетического» модифицирования, отмечается образование «сетки» полей напряжений, которые равномерно перераспределяют в структуре матрицы чугуна напряжения, которые возникают при растяжении (рис. 2, б, в).

Такое строение чугуна далеко от идеального, несмотря на то, что обеспечивает большую прочность материалу. В структуре такого чугуна также образуются цепочки, состоящие из графитовых включений, и возникают пиковые напряжения, что особенно четко проявляется при горизонтальном растяжении (рис. 2, в). Повышенная прочность чугуна с таким распределением графитовых включений обеспечивается большим многообразием путей вероятного образования трещины и перераспределением напряжений по всей матрице.



**Рис. 2. Результаты моделирования плоского напряженного состояния микроструктуры высокопрочного чугуна, полученного по технологии синергетического модифицирования: а – исходное распределение графитовой фазы,  $\times 100$ ; б – моделирование вертикального растяжения; в – моделирование горизонтального растяжения**

На данный момент из перечня металлических матриц, получаемых в высокопрочном чугуне, максимальный предел текучести соответствует структуре нижнего бейнита с минимальным содержанием остаточного аустенита ( $\approx 20\%$ ),  $\sigma_T = 1240$  МПа [11]. Такая структура может быть получена в результате изотермической закалки чугуна по следующему режиму:  $T_{\text{аус}} = 900 - 950$  °С;  $T_{\text{из.зак}} = 260 - 300$  °С.

Образцы чугуна, термически обработанные по представленному режиму, обладали следующими свойствами:  $\sigma_B = 1500 - 1620$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 1220 - 1300$  МПа; 45 – 50 HRC;  $\delta \approx 1 - 2,5\%$ . Таким образом, используя методы компьютерного моделирования структуры чугуна и ее оптимизации, удалось повысить прочностные свойства изделий, путем направленного усовершенствования технологического процесса при обеспечении наиболее рациональных параметров графитовой фазы.

### Выводы

1. Разработана методика оптимизации процессов структурообразования, протекающих в графитизированных чугунах. Использование данной методики позволяет целенаправленно управлять процессами структурообразования для обеспечения заданного уровня свойств в изделиях из графитизированных чугунов.

2. Разработаны компьютерные модели структуры графитизированных чугунов. Исследование разработанных моделей позволяет выявить и в последующем устранить слабые участки структуры материала.

3. Была определена взаимосвязь между размерно-топологическими характеристиками графитовой фазы технологическими факторами, оказывающими влияние на ее формирова-

ние при кристаллизации чугуна. С использованием разработанных технологий модифицирования были устранены ослабляющие участки в структуре графитизированных чугунов, что позволило обеспечить высокий уровень прочностных свойств в изделиях.

4. Использование разработанных методов позволило обеспечить в изделиях из высокопрочного чугуна более равномерного распределения графитовых включений и улучшить их геометрические параметры. Для точного описания размерно-топологических характеристик использовали методы, основанные на фрактальной геометрии.

#### Библиографический список

1. Advanced Computational Materials Modeling / Edited by Miguel Vaz Júnior, Eduardo A. de Souza Neto, and Pablo A. Munoz-Rojas. – Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2011. – 432 p.
2. Janssens, K.G. F. Computational Materials Engineering. An Introduction to Microstructure Evolution / K.G.F. Janssens, D. Raabe, E. Kozeschnik, M.A. Miodownik, B. Nestler. – Amsterdam, Boston, Heidelberg, London: Elsevier, 2007. – 344 p.
3. Прохоров, Н.Н. Физические процессы в металлах при сварке. Т. II. Внутренние напряжения, деформации и фазовые превращения / Н.Н. Прохоров. – М.: Металлургия, 1976. – 600 с.
4. Косников, Г.А. Аустемпированные чугуны с шаровидным графитом / Г.А. Косников, Л.М. Морозова // Литейное производство. 2013. № 12. С. 8 – 12.
5. Макаренко, К.В. Компьютерное моделирование и оптимизация структуры высокопрочного чугуна с шаровидным графитом // Вестник машиностроения. 2011. № 9. С. 69 – 73.
6. Мэттьюз, Ф. Композитные материалы. Механика и технология / Ф. Мэттьюз, Р. Ролингс. – М.: Техносфера, 2004. – 408 с.
7. Макаренко, К.В. Фрактальный анализ структурообразования чугуна / К.В. Макаренко. – Брянск: БГТУ, 2013. – 91 с.
8. Зайченко, Ю.П. Исследование операций / Ю.П. Зайченко. – Киев: Вища школа, 1975. – 320 с.
9. Макаренко, К.В. Системный анализ технологии производства отливок из чугуна / К.В. Макаренко. – Брянск: БГТУ, 2013. – 164 с.
10. Макаренко, К.В. Синергетический подход в разработке процесса измельчения графитных включений в высокопрочном чугуне // Литейное производство. 2008. № 6. С. 7 – 8.
11. Чугун: справочник / под ред. А.Д. Шермана, А.А. Жукова. – М.: Металлургия, 1991. – 576 с.

Дата поступления  
в редакцию 01.03.2014

K.V. Makarenko

#### OPTIMIZATION DIMENSION-TOPOLOGICAL PARAMETERS OF GRAPHITE PHASE IN ORDER TO INCREASE MECHANICAL PROPERTIES OF CAST IRON

Bryansk State Technical University

**Purpose:** Develop a methodology for optimizing the dimension- topological parameters of graphite phase to improve the mechanical properties of the products of nodular cast iron.

**Design/methodology/approach:** The technique is based on the representation of the structure of cast iron as a composite material where the metal matrix and graphite phases have their own parameters. Modeling the structure of materials reveals weak points in the structure. By using the process, control factors can eliminate the defects of the structure material. To determine the dimension of topological parameters of graphite phase method using fractal image analysis of the microstructure of cast iron.

**Findings:** When using techniques developed with technological control parameters can be obtained from the product of cast iron with a given level of mechanical and performance properties.

**Research limitations/implications:** The technique can be used to optimize the structure of the various construction materials.

**Originality/value:** Approach in which the structure of the material is presented as a composite matrix borrowed from structural mechanics. Use it in conjunction with computer modeling opens up broad prospects for the development of new materials and technologies.

*Key words:* cast iron, graphite, structure, modeling, destruction, mechanical properties, strength.