

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ШАРОВИДНОГО ГРАФИТА В АУСФЕРРИТНОМ ВЫСОКОПРОЧНОМ ЧУГУНЕ

**П. Е. ЛУЩИК**, канд. техн. наук, **И. В. РАФАЛЬСКИЙ**, канд. техн. наук,  
**А. И. ПОКРОВСКИЙ**, канд. техн. наук  
РИУП «НТП БНТУ «Политехник»

*Исследованы и обсуждены закономерности формирования шаровидного графита в аусферритном высокопрочном чугуна, заключающиеся в том, что зарождение, рост и развитие фаз графита начинаются с образования шарообразного включения с высокой концентрацией железа и кремния (кремнистого феррита). Комплексы сегментарно расположенных периферийных пластин, образуя сегментарно-ячеистую структуру шаровидного включения графита, формируются на поверхности шарообразного включения в процессе кристаллизации сплава. Разработана конечно-элементная модель включения графита, состоящая из фрагментов ферритной матрицы, шаровидного центра включения кремнистого феррита и комплекса сегментарно расположенных периферийных пластин. Выполнено численное моделирование деформации шаровидного графита и возникающих в процессе деформации напряжений.*

**Ключевые слова:** моделирование, аусферритный чугун, шаровидный графит, структура.

## SIMULATION OF SPHEROIDAL GRAPHITE DEFORMATION IN AUSFERRITIC CAST IRONS

**P. E. LUSHCHIK**, Ph. D. in Technical Sciences, **I. V. RAFALSKI**, Ph. D.  
in Technical Sciences, **A. I. POKROVSKI**, Ph. D. in Technical Sciences  
Science and Technology Park of BNTU “Polytechnic”

*The regularities of the formation of spheroidal graphite in ausferritic cast iron are investigated and discussed, which consist in the fact that the nucleation, growth and development of graphite phases begin with the formation of a spherical inclusion with a high concentration of iron and silicon (silicon ferrite). Complexes of segmentally located peripheral plates, forming a segmental-cellular structure of a spherical graphite inclusion, are formed on the surface of a spherical inclusion in the process of alloy crystallization. A finite element*

*model of graphite inclusion has been developed, which consists of fragments of a ferrite matrix, a spherical center of inclusion of silicon ferrite, and a complex of segmentally located peripheral plates. Numerical modeling of spheroidal graphite deformation and stresses arising in the process of deformation has been performed.*

**Keywords:** *simulation, ausferritic cast irons, spheroidal graphite, structure.*

**Введение.** Большой интерес исследователей, традиционно проявляемый к чугунам, объясняется высоким комплексом технологических и механических свойств при сравнительно низкой стоимости их получения. Основные направления исследований акцентированы на задачах совершенствования структуры и повышения свойств чугуна путем изменения морфологии графита от разветвленной к сферической (высокопрочный чугун) и переход на аустенитобейнитную структуру металлической матрицы, которая содержит некоторое количество нераспавшегося аустенита (аусферритный чугун), что достигается за счет использования методов модифицирования при литье сплавов, термической обработки и деформации [1–4].

Аусферритный высокопрочный чугун (АВЧ) со сферическим графитом, полученный в процессе изотермической термообработки, обеспечивая конкурентные преимущества по сравнению с другими сплавами на основе системы Fe-C, является перспективным конструкционным материалом для ответственных машиностроительных изделий: поршневые и уплотнительные кольца, блоки цилиндров, коленчатые и распределительные валы, тормозные барабаны, диски сцепления, тормозные барабаны, ступицы колес, коробки дифференциалов, кронштейны, гидравлические муфты, подвески рессор, картеры задних мостов и др. [4].

**Экспериментальная часть.** В работе приведены результаты исследований процессов структурообразования АВЧ (химический состав представлен в таблице 1), подвергнутого пластической деформации при температуре 970 °С.

Установлено, что структура металлической основы полученного в литом состоянии АВЧ состоит из бейнита, формирующегося при непрерывном охлаждении литого легированного чугуна, при этом

аустенит распадается на феррит ( $\alpha$ -фазу) и остаточный  $\gamma$ -аустенит с повышенным содержанием углерода (рисунок 1, *a*).

Таблица 1 – Химический состав аусферритного высокопрочного чугуна

Химический элемент	C	Si	Mn	Ni	Mo	Cu	Fe
Содержание, % мас.	2,839–2,891	2,119–2,564	0,320–0,441	1,234–1,431	0,182–0,270	0,460–0,784	ост.

Структура включений графита характеризуется высокой степенью неоднородности, в средней части включения образует кремнистый феррит (с высокой концентрацией кремния) и сегментарным расположением блочных структур мозаичного типа к поверхности, формируя характерную оторочку с высоким содержанием углерода (рисунок 1, *b*).

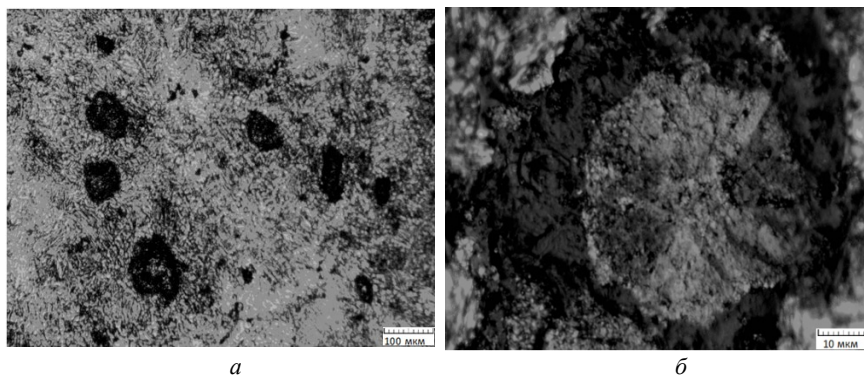


Рисунок 1 – Структура аусферритного высокопрочного чугуна:  
*a* – в литом состоянии; *b* – шаровидный графит с блочно-мозаичной структурой

На основании имеющихся данных о формировании графитных фаз в высокопрочном чугуне установлено, что их зарождение, рост и развитие начинаются с образования шарообразного включения с высокой концентрацией железа и кремния (кремнистый феррит). Далее в процессе кристаллизации сплава постепенно на поверхно-

сти шарообразного включения образуются пластины графита, образуя сегментарную структуру включения [5].

Структура АВЧ после пластической деформации (асимметричная прокатка, температура 970 °С) представлена на рисунке 2.

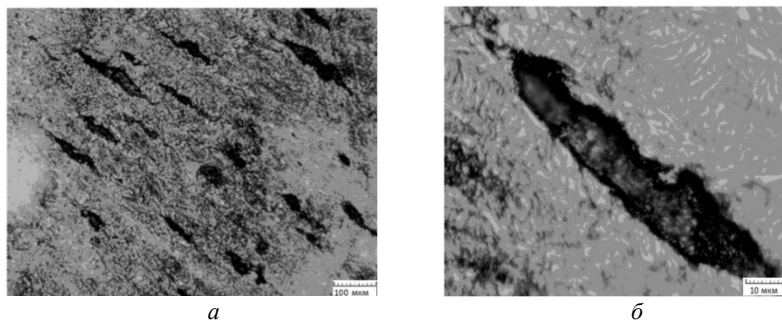


Рисунок 2 – Структура аустерритного высокопрочного чугуна:  
*a* – после пластической деформации при температуре 970 °С;  
*б* – структура графитного включения после пластической деформации

На рисунках 3, 4 приведены результаты фрактографического анализа изломов образцов с использованием данных сканирующего электронного микроскопа VEGA II LMU.

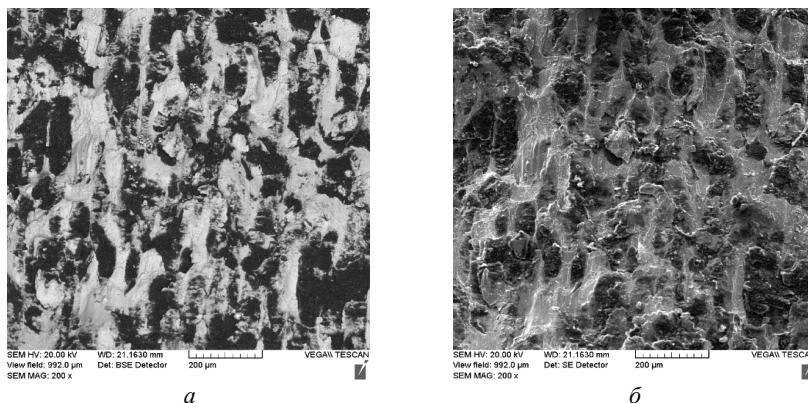


Рисунок 3 – Результаты сканирующей электронной микроскопии изломов пластически деформированного аустерритного высокопрочного чугуна графитного включения после прокатки:  
*a* – от отраженных электронов; *б* – от вторичных электронов

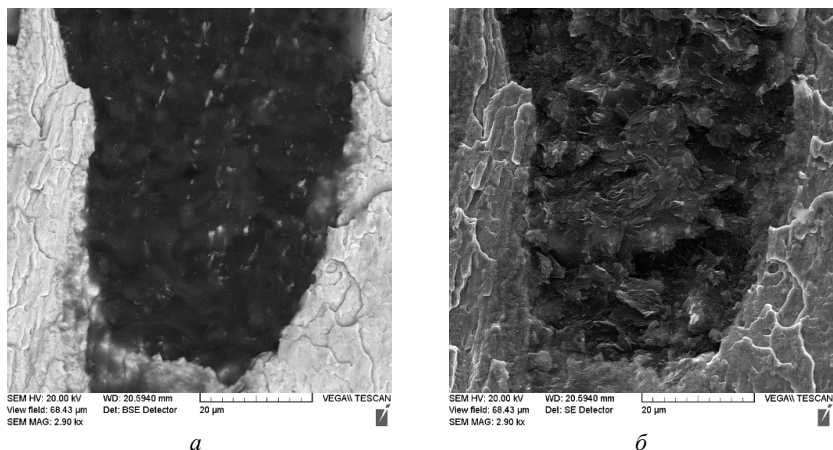


Рисунок 4 – Результаты сканирующей электронной микроскопии графитного включения в изломе пластически деформированного аустерритного высокопрочного чугуна графитного включения после прокатки: *а* – от отраженных электронов; *б* – от вторичных электронов

Установлено, что пластическая деформация АВЧ приводит к формированию характерной продольно-вытянутой структуры как металлической (бейнитной) матрицы, так и включений графита без видимых следов разрушения или нарушения сплошности в направлении, перпендикулярном приложению деформирующей нагрузки.

Изменение структуры чугуна обеспечивает высокий уровень его механических свойств, в частности предел прочности составляет 1270–1320 МПа, относительное удлинение 2–3 %.

**Моделирование деформации АВЧ.** С учетом данных о строении графитного включения в АВЧ разработаны твердотельные 3D-модели шаровидного графита, состоящие из шара, сегментарно окруженного пластинами, в основании которых будут пяти- и шестиугольные формы, а также проведен численный анализ процесса объемной деформации включения.

Для минимизации вероятности получения ошибки расчетов модель мезофрагмента включения графита была смасштабирована путем использования функции *Scaling*. Пластинам, сжимающим модель, были заданы параметры абсолютно жесткого тела, и установлено, что между собой каждый элемент графитной пирамиды взаимодействует контактом с трением, коэффициент которого при-

нят равным 0,1. Также принят контакт между элементами соседних пирамид и внутренним шаровидным включением кремнистого феррита.

В результате численного моделирования получены данные о направлении перемещений и деформации элементов мезофрагмента графитного включения и возникающих напряжений внутри пластин графита и шаровидного включения кремнистого феррита при упругой четырехсторонней деформации (рисунки 5, 6).

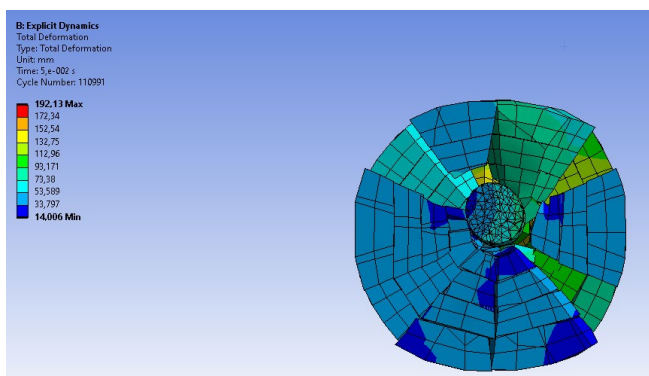


Рисунок 5 – Визуализация смещений элементов мезофрагмента графитного включения высокопрочного чугуна (поперечное сечение)

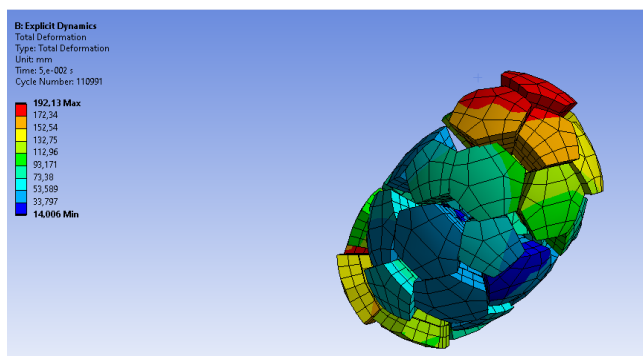


Рисунок 6 – Визуализация смещений элементов мезофрагмента графитного включения высокопрочного чугуна (общий вид 2)

Как видно из полученных данных, упругая модель четырехстороннего сжатия удовлетворительно описывает поведение элементов системы, что позволяет применять разработанную модель для уточненного расчета радиального сжатия и анализа вязко-пластичного состояния мезофрагмента при высокотемпературной деформации.

**Выводы.** Особенностью формирования шаровидного графита в аусферритном высокопрочном чугуна является то, что зарождение, рост и развитие фаз графита начинаются с образования шарообразного включения с высокой концентрацией железа и кремния (кремнистого феррита). В процессе кристаллизации сплава постепенно на поверхности шарообразного включения формируются комплексы сегментарно расположенных периферийных пластин, образуя сегментарно-ячеистую структуру шаровидного включения графита.

Разработана конечно-элементная модель включения графита, состоящая из фрагментов ферритной матрицы, шаровидного центра включения кремнистого феррита и комплекса сегментарно расположенных периферийных пластин. Выполнено численное моделирование деформации шаровидного графита и возникающих в процессе деформации напряжений.

## Список литературы

1. **Microstructure**, wear behavior and surface hardening of austempered ductile iron / B. Wang [et al.] // Journal of Materials Research and Technology. – 2020. – Vol. 9. – P. 9838–9855.

2. **Stefanescu, D. M.** State of the Art in Solidification Modeling of Cast Iron / D. M. Stefanescu // Science and Processing of Cast Iron VIII, Edited by Li Y. X., Shen Houfa, Xu Q. Y. and Han Z. Q. – 2006. – Tsinghua University Press, Beijing. – P. 32–41.

3. **Revisiting** the graphite nodule in ductile iron / E. Ghassemali [et al.] // Scripta Materialia. – 2019. – Vol. 161. – P. 66–69.

4. **Моделирование** процесса формирования литой структуры высокопрочного чугуна / И. В. Рафальский [и др.] // Металлургия: республ. межведом. сб. науч. тр. – Минск: БНТУ, 2021. – Вып. 42. – С. 137–147.

5. **Найдек, В. Л.** Шаровидный графит в чугунах / В. Л. Найдек, И. Г. Неижко, В. П. Гаврилюк // Процессы литья. – 2012. – № 5 (95). – С. 33–42.

## References

1. **Microstructure**, wear behavior and surface hardening of austempered ductile iron / B. Wang [et al.] // Journal of Materials Research and Technology. – 2020. – Vol. 9. – P. 9838–9855.
2. **Stefanescu, D. M.** State of the Art in Solidification Modeling of Cast Iron / D. M. Stefanescu // Science and Processing of Cast Iron VIII, Edited by Li Y. X., Shen Houfa, Xu Q. Y. and Han Z. Q. – 2006. – Tsinghua University Press, Beijing. – P. 32–41.
3. **Revisiting** the graphite nodule in ductile iron / E. Ghassemali [et al.] // Scripta Materialia. – 2019. – Vol. 161. – P. 66–69.
4. **Modelirovanie** processa formirivania litoj struktury vysokoprochnogo chuguna [Modeling the formation of cast structures in ductile iron] / I. V. Rafalski [et al.] // Metallurgia: respublikanskiy mezhvedomstvennyy sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: republican interdepartmental collection of scientific papers. – Minsk: BNTU Publ., 2021. – Vyp. 42. – P. 137–147.
5. **Naidek, V. L.** Sharovidny grafit v chugunah [Spheroidal graphite in cast irons] / V. L. Naidek, I. G. Neizhko, V. P. Gavrilyuk // Processy litiya = Casting processes. – 2012. – No. 5 (95). – P. 33–42.

Поступила 19.10.2022

Received 19.10.2022