



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-4-102-111>
УДК 669.13.017:620.18

Поступила 09.10.2024
Received 09.10.2024

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНУТРЕННЕГО СТРОЕНИЯ ШАРОВИДНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ ГРАФИТА В ВЫСОКОПРОЧНОМ ЧУГУНЕ И ЕГО ПОВЕДЕНИЯ ПРИ НАГРУЖЕНИИ

А. И. ПОКРОВСКИЙ, Физико-технический институт НАН Беларуси,
г. Минск, Беларусь, ул. Купревича, 10. E-mail: art@phti.by

И. В. РАФАЛЬСКИЙ, П. Е. ЛУЩИК, Государственное предприятие «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник», г. Минск, Беларусь, ул. Я. Коласа, 24

Целью работы является построение методом конечных элементов модели шаровидного включения графита в высокопрочном чугуна, моделирование процесса его разрушения при двустороннем сжатии и верификация моделей при проведении экспериментов по сжатию.

Построены трехмерная модель шаровидного включения графита в высокопрочном чугуна, а также конечно-элементная модель, которая включает в себя более миллиона конечных элементов. При построении модели основывались на предположении, что в центре включения графита находится микроскопическая инородная шарообразная частица. По одной из версий она представляет собой сложную комбинацию оксидов, сульфидов и окисульфидов, причем наружный слой частицы когерентен с решеткой графита; по другой версии – это частица кремнистого феррита, которая обрамлена графитом, имеющим поликристаллическое секторальное строение в виде пирамидальных структур с вершинами, расходящимися от центра частицы. В основании пирамид находятся пяти- и шестиугольники. Каждый сегмент пирамиды включает в себя множество графитных пластин, расположенных параллельно и наслаивающихся друг на друга.

Численное моделирование двухосной (четырёхсторонней) деформации шаровидного включения графита с использованием программы Ansys показало, что центральный зародыш не деформируется и не разрушается; напряжения в нем не превышают 53 МПа. Разрушение вначале происходит по границам графитовых пирамидальных структур, а на определенных этапах и сами они разрушаются. В продольном сечении заметно также смещение графитных плоскостей внутри пирамид. Напряжения в различных частях пирамидальных структур различаются на порядок и варьируются от 14 МПа (в основном в центральной части) до 192 МПа (на краях графитного включения).

Для верификации компьютерных моделей были проведены эксперименты на сжатие образцов высокопрочного чугуна при комнатной температуре на разрывной машине. Исследования с помощью РЭМ подтвердили секторально-пирамидальное строение включения графита с наличием внутри пирамид параллельных плоскостей. Экспериментально доказано, что, начиная с определенной нагрузки, происходит полное разрушение составляющих пирамиду пакетов из графитных плоскостей.

Результаты моделирования четырехстороннего сжатия адекватно описывает поведение шаровидного включения графита. В дальнейшем полученные результаты будут использованы для сравнения поведения графита при высокотемпературной (900–1000 °С) деформации чугуна методом выдавливания.

Ключевые слова. Высокопрочный чугун, моделирование, шаровидный графит, внутреннее строение включения, нагружение, разрушение.

Для цитирования. Покровский, А. И. Моделирование внутреннего строения шаровидного включения графита в высокопрочном чугуна и его поведения при нагружении / А. И. Покровский, И. В. Рафальский, П. Е. Луцки // *Литье и металлургия*. 2024. № 4. С. 102–111. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-4-102-111>.

MODELING OF THE INTERNAL STRUCTURE OF A SPHERICAL GRAPHITE INCLUSION IN DUCTILE CAST IRON AND ITS BEHAVIOR UNDER LOADING

A. I. POKROVSKY, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Belarus, 10, Kuprevicha str. E-mail: art@phti.by

I. V. RAFALSKI, P. E. LUSHCHYK, State Enterprise “Science and Technology Park of BNTU “Polytechnic”,
Minsk, Belarus, 24, Ya. Kolasa str.

The goal of this work is to develop a finite element model of a spherical graphite inclusion in ductile cast iron, modeling the process of its destruction under bilateral compression and verification of models by performing compression experiments.

A three-dimensional model of a spherical graphite inclusion in ductile cast iron is developed and a finite element model that includes more than one million finite elements. It is constructed based on the assumption that in the center of the graphite inclusion there is a microscopic foreign spherical particle. According to one of the versions, it is a complex combination of oxides, sulfides and oxysulfides, the outer layer of this particle being coherent with the graphite lattice; according to another version, it is a particle of siliceous ferrite. This particle is framed by graphite, which has a polycrystalline sectoral structure in the form of pyramids with vertices diverging from the center of the particle; at the base of the pyramids are pentagons and hexagons. Each segment of the pyramid includes many graphite plates arranged parallel and layered on top of each other.

Numerical modeling of biaxial (quadrilateral) deformation of spherical graphite inclusion was carried out using the Ansys program. It is shown that the central particle is not deformed nor destroyed; the stresses in it do not exceed 53 MPa. It is demonstrated that destruction initially occurs along the boundaries of graphite pyramids, and at certain stages they are destroyed. In the longitudinal section, the displacement of the graphite planes inside the pyramids is also noticeable. The stresses in different parts of the pyramids differ by an order of magnitude and range from 14 MPa (mainly in the central part) to 192 MPa (at the edges of the graphite inclusion).

To verify the computer models, experiments were performed on the compression of ductile cast iron samples at a room temperature using a tensile testing machine. SEM studies have confirmed the sector-pyramidal structure of a graphite inclusion with the presence of parallel planes inside the pyramids. It has been shown experimentally that, starting from a certain load, complete destruction of the pyramid-shaped packets of graphite planes occurs. The results of modeling of quadrilateral compression adequately describe the behavior of a spherical graphite inclusion. In future, the obtained results will be used for comparison with the behavior of graphite at high-temperature (900–1000 °C) deformation of cast iron.

Keywords. Ductile cast iron, casting, modeling, spheroidal graphite, internal structure of inclusion, loading, fracture.

For citation. Pokrovsky A. I., Rafalski I. V., Lushchik P. E. Modeling of the internal structure of a spherical graphite inclusion in ductile cast iron and its behavior under loading. Foundry production and metallurgy, 2024, no. 4, pp. 102–111. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-4-102-111>.

Введение

В настоящее время большинство исследователей придерживаются мнения о поликристаллическом секторальном строении включений шаровидного графита в высокопрочном чугуна (ВЧ). Предполагают, что в центре включения расположено сферическое ядро, состоящее из сложных оксидов и сульфидов [1], а радиально от него находится большое число графитных пирамидальных структур (рис. 1, а) [1]. На металлографическом шлифе сечения этих пирамид имеют вид секторов со специфической структурой, состоящей из концентрически расположенных слоев углерода с характерной границей между секторами (на рис. 1, б расположена по диагонали) [1].

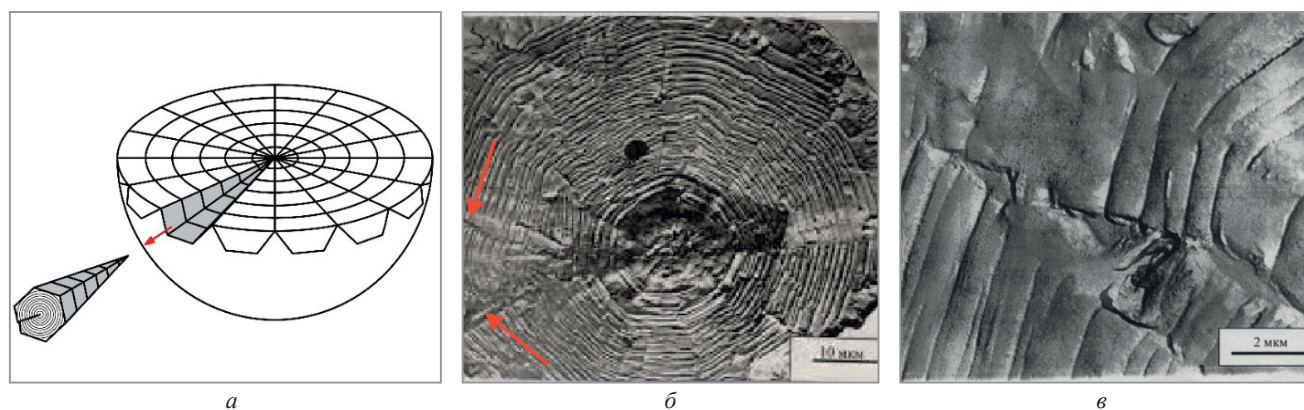


Рис. 1. Секторальное строение шаровидного графита в высокопрочном чугуна и концентрическое расположение пластин:
 а – схематическое расположение пирамидальных структур в шаровидном графитном включении;
 б – послойное расположение пластин графита внутри пирамидальных структур [1];
 в – граница между секторами (стык пирамидальных структур) [1]

Рост шаровидного графита происходит в радиальном направлении наружу за счет поочередного наслаивания базисных плоскостей углерода друг на друга.

Краткий обзор предыдущих исследований

Одну из первых моделей зародыша, на котором выделяется графит, предложил Т. Skaland [2]. Центральной частью зародыша является частица сложного сульфида кальция-магния-стронция (Ca, Mg, Sr ...) S. За ней следует промежуточная оболочка в виде оксида магния-кремния (MgO·SiO₂). Наружный слой зародыша представляет собой сложный металлооксид (MeO·SiO₂) с гексагональной решеткой, с которой уже впоследствии может когерентно связываться решетка графита (рис. 2).

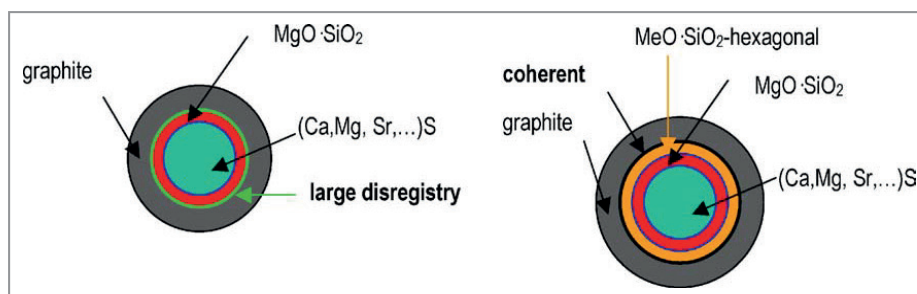


Рис. 2. Модель зародыша включения графита (Т. Skaland [2])

По другой версии зародышем шаровидного включения графита является частица кремнистого феррита. Например, в [3] показано, что кремнистый феррит может находиться внутри включения графита (его включения показаны стрелками на рис. 3).

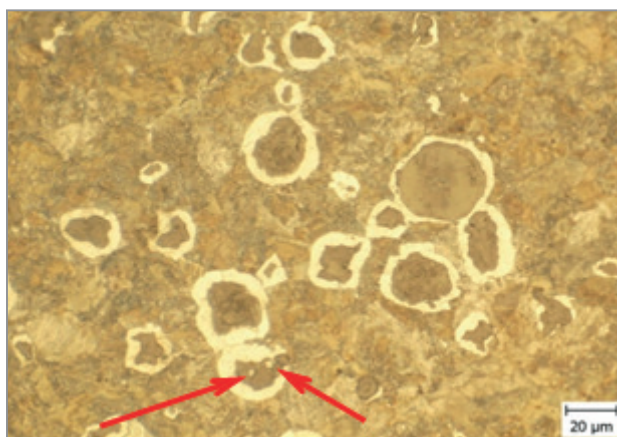


Рис. 3. Частицы кремнистого феррита внутри графитного включения. Травлено ниталем. $\times 400$ [3]

Подробный обзор исследований, посвященный истории моделирования процессов зарождения включений графита, выполнил D. M. Stefanescu в [4–6], где перечислены основные достижения в моделировании кристаллизации чугуна и проблемные вопросы, остающиеся неисследованными: зародышеобразование графита, предсказание формы, размеров и морфологии графита, вероятность образования карбидов, возможность предсказания механических свойств. В работах [7–10] всесторонне исследована нуклеация графитных включений и предложены модели их роста.

A. V. Catalina и др. [11, 12] предложили модифицированную модель Джексона-Ханта для роста эвтектики в чугуне, применимую как к обычным, так и нерегулярным эвтектикам. Модель предусматривает изотермическую границу раздела и учитывает разницу плотностей между жидкостью и двумя твердыми фазами. Для разных переохлаждений определены четыре характеристических расстояния, при которых переохлаждение минимально.

L. Beltran-Sanchez и D. M. Stefanescu [13] улучшили предыдущую модель, включая кристаллизацию первичных зерен аустенита и инициируя рост графита. Показано, что после контактирования с зернами аустенита графит может расти по диффузионному механизму.

Более полная модель для прогнозирования статических механических свойств серого и высокопрочного чугуна была предложена A. Catalina, X. Guo и др. [14]. Вначале разработали сферическую симметричную модель для роста эвтектического зерна в сером чугуне, предполагая, что рост контролируется диффузией. Затем происходит контролируемый диффузией рост ферритных зерен и утолщение графита.

Наиболее интересные результаты изложены в работах О. В. Соценко [15, 16], где представлено компьютерное моделирование формирования графитных включений различной морфологии на основе DLA-модели (DLA – diffusion limited aggregation – диффузионно-лимитированная агрегация). Такой подход позволяет создавать адекватные модели путем построения фрактального кластера, образованного из отдельных частиц. Ограниченное двумерное пространство разбивается на множество квадратных ячеек. В одну из них помещают частицу-затравку, а затем из удаленного источника на границе области поочередно выпускаются частицы, которые совершают броуновское движение. Каждая новая частица передвигается в соседнюю клетку случайным образом – ее путь выбирают методом Монте-Карло.

DLA-модели имеют удовлетворительное согласование с экспериментальными данными по строению компактных графитных включений. Однако такие модели применимы только для монолитных сферических включений и не учитывают поликристаллическое строение графита.

В работе [17], посвященной моделированию нуклеации углеродных структур, разработана методология и выявлена последовательность структурных превращений: кластеризация, гибридизация, графитизация.

Таким образом, в работах по моделированию зарождения и роста шаровидных графитных включений при кристаллизации ВЧ еще много пробелов. В большинстве своем модели являются эмпирическими. Представляет интерес создать модель на основе поликристаллического строения включения (с центральным ядром и секторально-пирамидальной структурой вокруг него) методом конечных элементов. Поскольку чугуны класса ВЧ являются в ряде случаев эффективными конкурентами и заменителями легированных сталей по прочности, целесообразно также провести моделирование разрушения включения и сравнить с экспериментальными данными.

Результаты исследований и их обсуждение

Построение модели шаровидного включения графита в высокопрочном чугуне

На основании проанализированных выше литературных данных о формировании графитных включений в ВЧ установлено, что их зарождение и рост начинается с образования зародыша микроскопической шарообразной частицы. По одной из версий эта частица представляет собой сложную комбинацию оксидов, сульфидов и оксисульфидов, причем наружный слой частицы когерентен с решеткой графита. По другой версии – это частица с высокой концентрацией железа и кремния (кремнистый феррит).

При построении трехмерной модели графитного включения такую сферическую частицу принимали за центр модели (рис. 4). Снаружи она окружена многими пирамидами, расположенными остриями к центру, в основании пирамид находятся пяти- и шестиугольники. Каждый модельный сегмент пирамиды включает в себя множество графитных пластин, которые, как видно из рис. 1, *а*, *б*, в процессе кристаллизации постепенно наслаиваются друг на друга, причем достаточно четко различимы границы секторов, образующие сегментарную структуру графитного включения. С учетом таких предположений разработана трехмерная твердотельная модель строения включения графита, состоящая из сферического ядра в центре (рис. 4, *а*), и конечно-элементная модель мезофрагмента: «ферритная матрица – комплекс сегментарно расположенных пластин включения графита (пирамид) – шаровидный зародыш» для дальнейшего численного анализа (рис. 4, *б*).

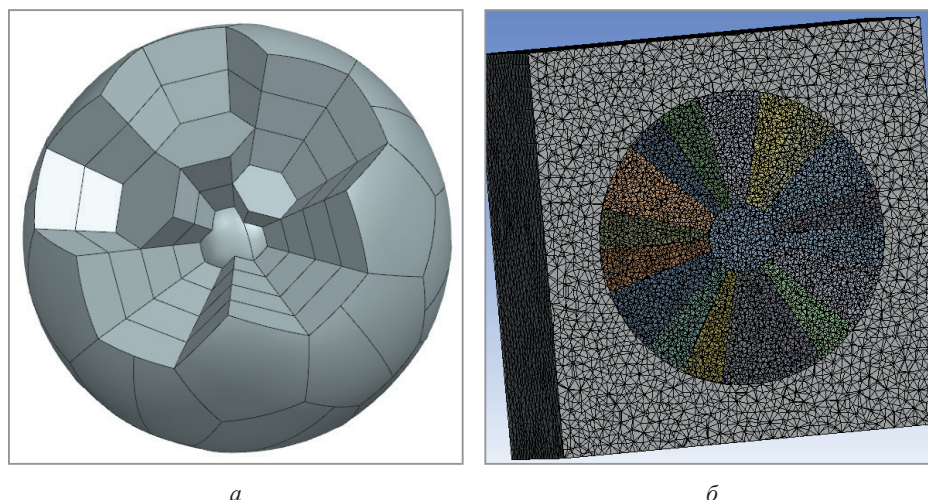


Рис. 4. Модель внутреннего строения включения шаровидного графита в высокопрочном чугуне:
а – трехмерная твердотельная модель включения графита; *б* – конечно-элементная модель (в сечении) системы «ферритная матрица – комплекс сегментарно расположенных пластин включения графита (пирамид) – шаровидный зародыш»

Построены трехмерные конечно-элементные модели фрагментов структуры всех составляющих графитного включения: шаровидного центра и комплекса сегментарно расположенных вокруг него пластин графита, находящихся в ферритной матрице (рис. 5).

Модель включения графита была разбита на 1 160 307 объемных конечных элементов (рис. 6).

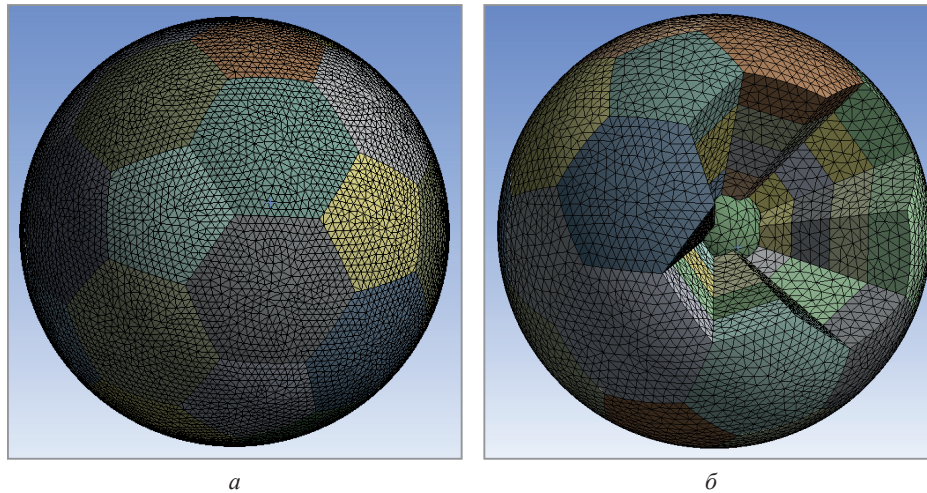


Рис. 5. Конечно-элементная модель включения шаровидного графита в высокопрочном чугуна: *a* – вид снаружи; *б* – внутреннее строение

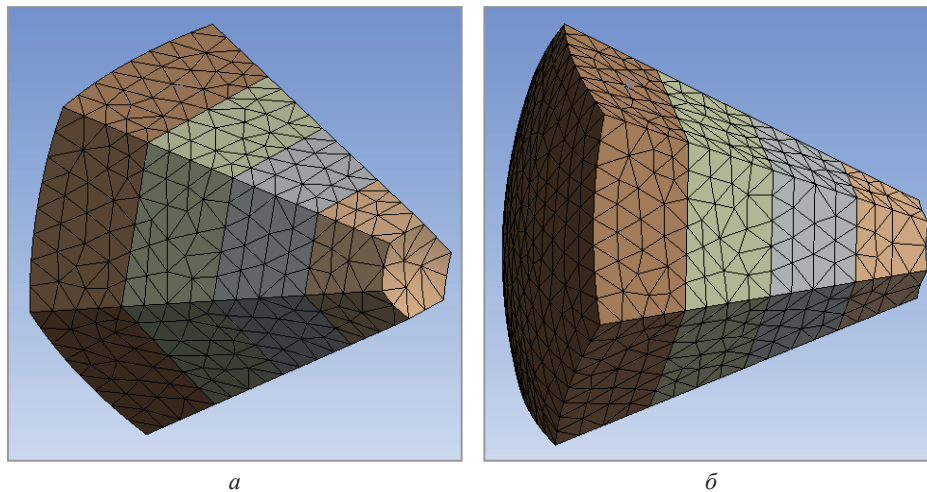


Рис. 6. Конечно-элементная модель одного из периферийных сегментов включения графита: *a, б* – различные виды

Моделирование разрушения включения шаровидного графита при простом двухосном сжатии

Проведен численный анализ двухосной (четырёхсторонней) деформации включения шаровидного графита в программе Ansys. При этом деформация происходит по осям *X* и *Y*, а по оси *Z* – свободное перемещение включения до момента его полного разрушения (рис. 7).

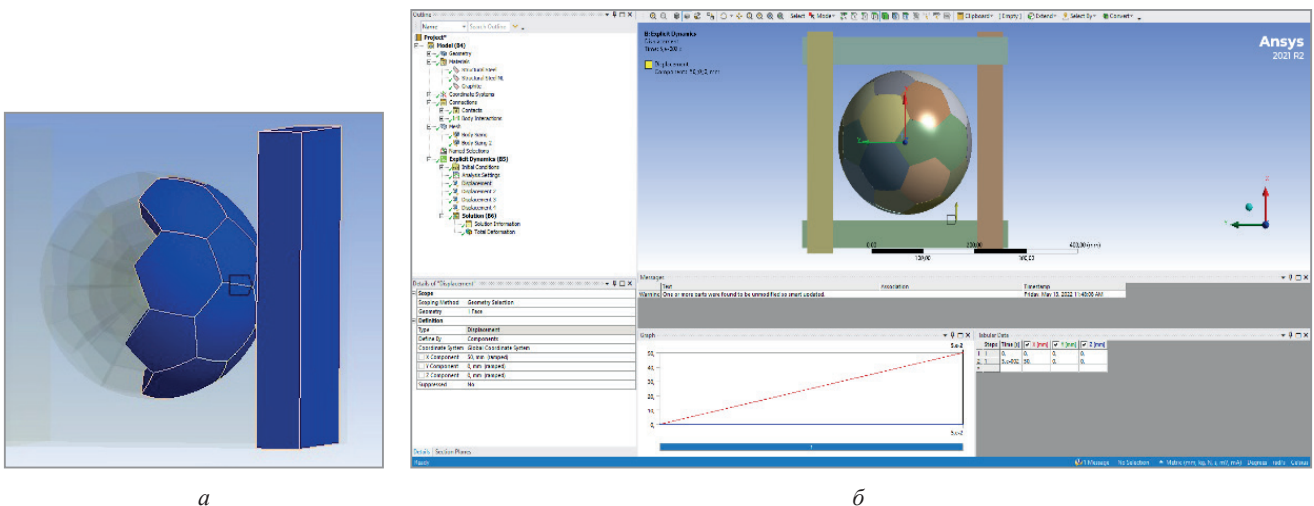


Рис. 7. Схема приложения нагрузки к включению шаровидного графита при двухосной (четырёхсторонней) деформации: *a* – схема контакта включения с пластиной; *б* – назначение параметров контакта и перемещения сдавливающих пластин

В качестве центра шаровидного включения графита рассматривали частицу кремнистого феррита. Пластины, сжимающие модель, считались абсолютно жесткими. Используемые теплофизические и механические параметры графита и кремнистого феррита приведены на рис. 8, а, б.

Property	Value	Unit
Material Field Variables	Table	
Density	2266	kg m ⁻³
Isotropic Elasticity		
Derive from	Young's Modulus and Poisson...	
Young's Modulus	1,6E+06	psi
Poisson's Ratio	0,312	
Bulk Modulus	9,7798E+09	Pa
Shear Modulus	4,2041E+09	Pa
Isotropic Thermal Conductivity	24	W m ⁻¹ C ⁻¹
Specific Heat Constant Pressure, C _p	709	J kg ⁻¹ C ⁻¹

а

Property	Value	Unit
Material Field Variables	Table	
Density	7850	kg m ⁻³
Isotropic Elasticity		
Derive from	Young's Modulus and Poisson...	
Young's Modulus	2E+11	Pa
Poisson's Ratio	0,3	
Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa
Shear Modulus	7,6923E+10	Pa
Bilinear Isotropic Hardening		
Specific Heat Constant Pressure, C _p	434	J kg ⁻¹ C ⁻¹

б

Рис. 8. Задание теплофизических и механических параметров графита (а) и кремнистого феррита (б) (скриншоты рабочего окна программы)

Между собой каждый элемент графитной пирамиды взаимодействует с трением, коэффициент которого принят равным 0,1. Также учитывали контакт между элементами соседних пирамид и внутренним шаровидным включением кремнистого феррита (рис. 9).

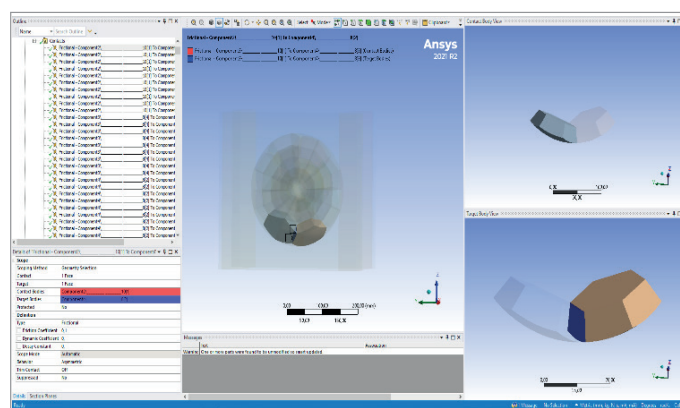


Рис. 9. Назначение параметров контакта между элементами (графитными секторами) моделируемой системы (скриншоты программы)

В результате численного моделирования получены данные о направлении перемещений и деформации элементов мезофрагмента графитного включения ВЧ, а также напряжений внутри пластин графита и в ядре (кремнистый феррит) при упругой двухосевой четырехсторонней деформации (рис. 10). Заметно, что разрушение происходит по границам сегментов (рис. 10, а). В продольном сечении заметно также смещение графитных плоскостей внутри пирамид (рис. 10, б). Напряжения в центральном ядре не превышают 53 МПа, причем оно практически не деформируется. Напряжения в различных частях пирамид различаются на порядок и варьируются от 14 МПа (в основном в центральной части) до 192 МПа (на краях включения).

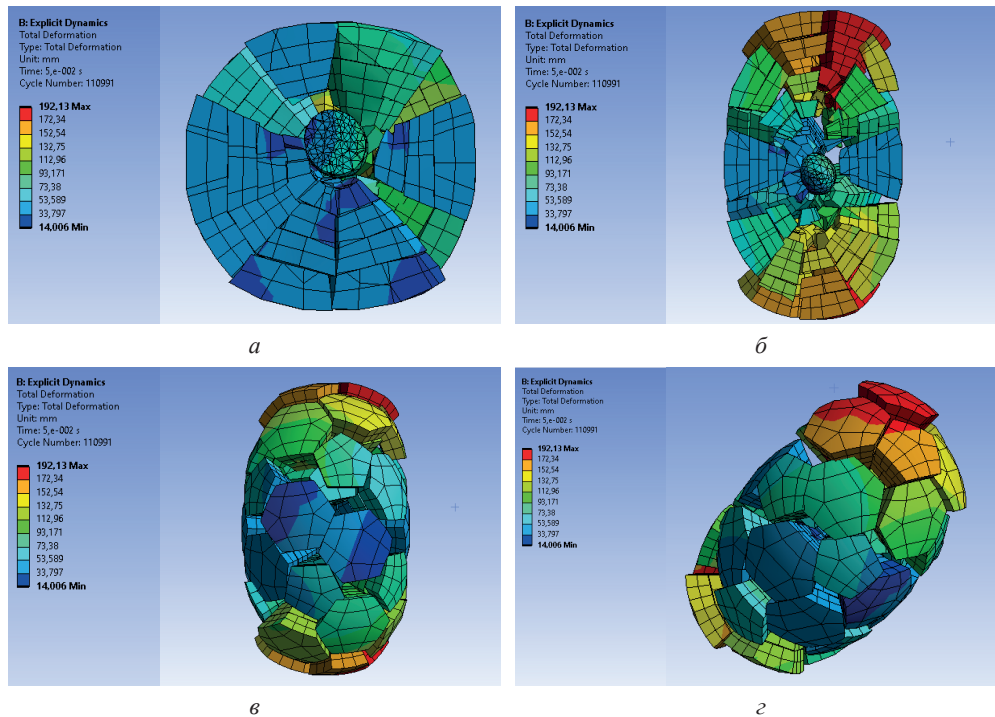


Рис. 10. Визуализация смещений элементов, составляющих мезофрагмент шаровидного графитного включения ВЧ при двухосном сжатии: *а* – поперечное сечение включения; *б* – продольное сечение включения; *в, г* – аксонометрия

На рис. 11 приведены значения напряжений по Мизесу в мезофрагменте графитного включения высокопрочного чугуна. Из рисунка видно, что шаровидный зародыш кремнистого феррита внутри графита при разрушении включения не повреждается.

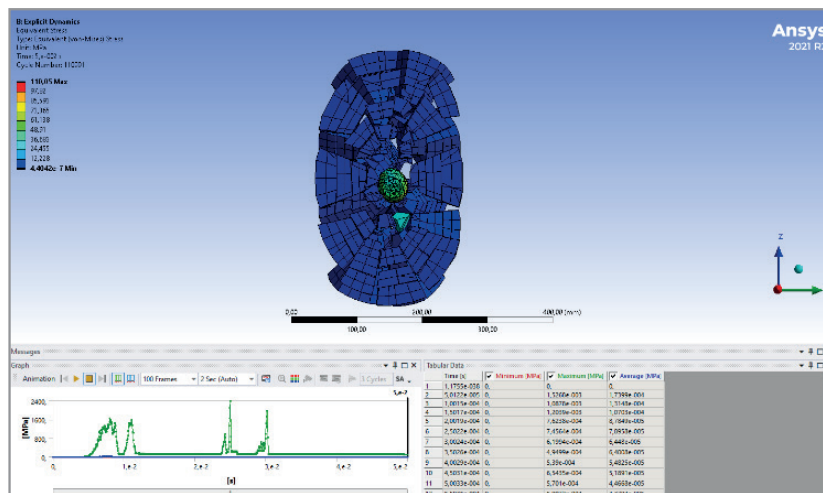


Рис. 11. Значения напряжений по Мизесу в мезофрагменте графитного включения высокопрочного чугуна (продольное сечение)

Для верификации компьютерных моделей были проведены эксперименты по сжатию образцов высокопрочного чугуна на стандартной разрывной машине. РЭМ-изображения разрушенных графитных включений приведены на рис. 12.

Из рис. 12, *а, б* видно, что на определенных этапах нагружения наблюдаются фрагменты разрушенных графитных пирамид с отчетливо выраженным слоистым (пакетным) строением (отмечены красными кружками), состоящим из стопки параллельных пластин. На рис. 12, *в, г* показано, что, начиная с определенной нагрузки, происходит полное разрушение составляющих призму пакетов из графитных плоскостей и разрушение самих пирамид на множество пластин.

Таким образом, упругая модель четырехстороннего сжатия достаточно хорошо описывает поведение элементов системы. В дальнейшем полученные результаты будут использованы для анализа поведения графита при высокотемпературной (900–1000 °С) деформации чугуна.

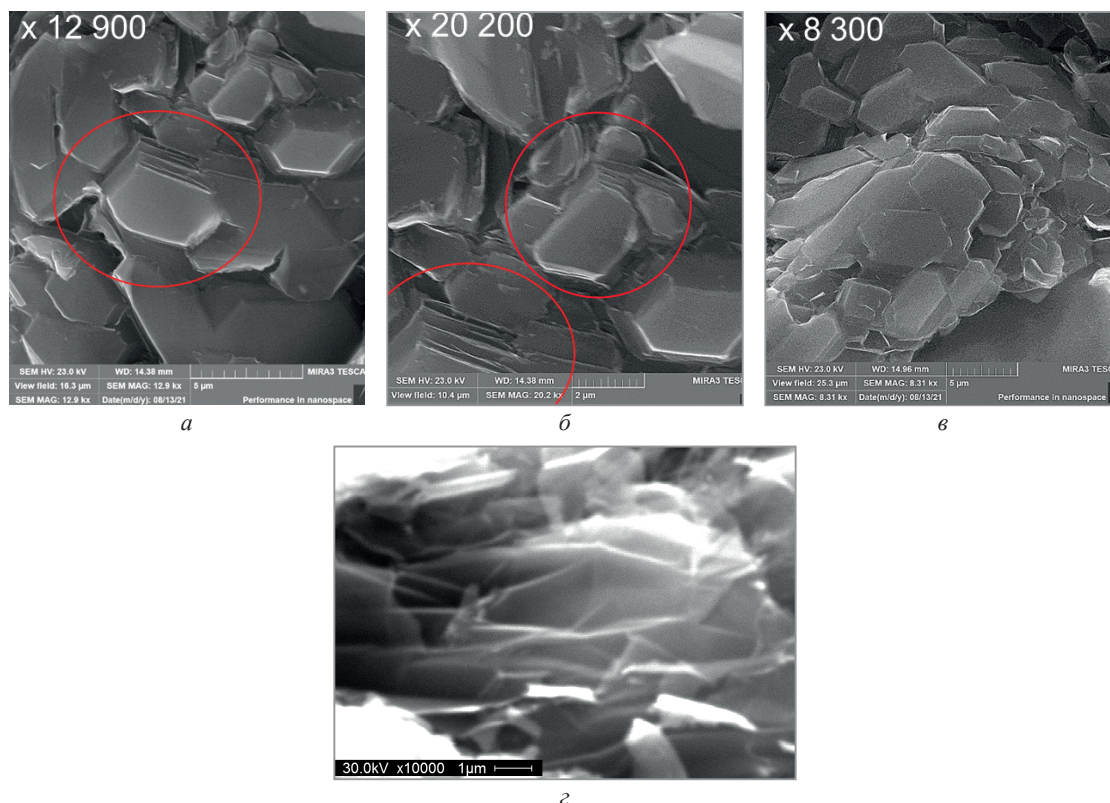


Рис. 12. РЭМ-изображения разрушенных двухосным сжатием графитных включений в высокопрочном чугунае: *a* – $\times 12900$; *б* – $\times 20200$; *в* – $\times 8300$; *г* – $\times 10000$

Выводы

1. Построены трехмерная модель шаровидного включения графита в высокопрочном чугунае, а также конечно-элементная модель, которая включает в себя более миллиона конечных элементов. При ее построении основывались на предположении, что в центре включения графита находится микроскопическая инородная шарообразная частица. По одной из версий она представляет собой сложную комбинацию оксидов, сульфидов и окисульфидов, причем наружный слой частицы когерентен с решеткой графита; по другой версии – это частица кремнистого феррита. Частица обрамлена графитом, имеющим поликристаллическое секторальное строение в виде пирамид с вершинами, расходящимися от центра частицы; в основании пирамид находятся пяти- и шестиугольники. Каждый сегмент пирамиды включает в себя множество графитных пластин, расположенных параллельно и наслаивающихся друг на друга.

2. Проведено численное моделирование двухосной (четырёхсторонней) деформации шаровидного включения графита в программе Ansys. Показано, что центральный зародыш при этом не деформируется и не разрушается; напряжения в нем не превышают 53 МПа. Показано, что разрушение вначале происходит по границам графитовых пирамидальных структур, а на определенных этапах они разрушаются. В продольном сечении заметно также смещение графитных плоскостей внутри пирамид. Напряжения в различных частях пирамидальных структур различаются на порядок и варьируются от 14 МПа (в основном в центральной части) до 192 МПа (на краях графитного включения).

3. Для верификации компьютерных моделей были проведены эксперименты на сжатие при комнатной температуре образцов высокопрочного чугуна на разрывной машине. Исследования с помощью РЭМ подтвердили секторально-пирамидальное строение включения графита с наличием внутри пирамид параллельных плоскостей. Экспериментально показано, что, начиная с определенной нагрузки, происходит полное разрушение составляющих пирамиду пакетов из графитных плоскостей.

4. Показано, что результаты моделирования четырехстороннего сжатия адекватно описывает поведение шаровидного включения графита. В дальнейшем полученные результаты будут использованы для сравнения поведения шаровидного графита при высокотемпературной (900–1000 °С) деформации чугуна методом выдавливания.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Верховлюк, А.М.** Особенности роста шаровидных включений графита в чугунах / А.М. Верховлюк, В.С. Шумихин, А.В. Назаренко // *Процессы литья*. – 2007. – № 5. – С. 11–18.
2. **Skaland, T.** A model for the graphite formation in ductile cast iron. Part I. Inoculation mechanisms // *Metallurgical Transactions A*. – 1993. – Vol. 24. – P. 2321–2345.
3. **Покровский, А.И.** Анализ химического состава и морфологии графитных включений в высокопрочном чугунах / А.И. Покровский // *Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр. в 2 кн. Кн. 1. Новые технологии и материалы / ред. колл.: В.Г. Залесский (гл. ред.) [и др.]*. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2021. – С. 224–234.
4. **Stefanescu D.M.** Solidification and modeling of cast iron – a short history of the defining moments / D.M. Stefanescu // *Materials Science and Engineering A*. – 2005. – Vol. 413–414. – P. 322–333.
5. **Stefanescu D.M.** Modeling of cast iron solidification – the defining moments / D.M. Stefanescu // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2005. – Vol. 38, No. 7. – P. 1433–1447.
6. **Stefanescu, D.M.** State of the art in solidification modeling of cast iron / D.M. Stefanescu // *Science and Processing of Cast Iron VIII*. – 2006. – P. 32–41.
7. Kinetics of nucleation and growth of graphite at different stages of solidification for spheroidal graphite iron / G. Alonso [et al.] // *International Journal of Metalcasting*. – 2017. – Vol. 11. – P. 14–26.
8. Revisiting the graphite nodule in ductile iron / E. Ghassemali [et al.] // *Scripta Materialia*. – 2019. – Vol. 161. – P. 66–69.
9. **Stefanescu, D.M.** The meritocratic ascendance of cast iron: from magic to virtual cast iron / D.M. Stefanescu // *International Journal of Metalcasting*. – 2019. – Vol. 13, iss. 4. – P. 726–752.
10. Graphite nucleation in compacted graphite cast iron / G. Alonso [et al.] // *International Journal of Metalcasting*. – 2020. – Vol. 14. – P. 1162–1171.
11. **Stefanescu, D.M.** Numerical micro-modeling of solidification / D.M. Stefanescu // *Science and Engineering of Casting Solidification*. Edited by D.M. Stefanescu. – Springer, Boston, MA, 2009, pp. 1–44.
12. **Catalina, A.V.** A new analytical approach to predict spacing selection in lamellar and rod eutectic systems / A.V. Catalina, S. Sen, D.M. Stefanescu // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2003. – Vol. 34, No. 2. – P. 383–394.
13. **Beltran-Sanchez, L.** A quantitative dendrite growth model and analysis of stability concepts / L. Beltran-Sanchez, D.M. Stefanescu // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2004. – Vol. 35, No. 8. – P. 2471–2486.
14. **Catalina, A.V.** Prediction of room temperature microstructure and mechanical properties in lamellar iron castings / A.V. Catalina, X. Guo, D.M. Stefanescu, L. Chuzhoy, M.A. Pershing // *AFS Transactions*. – 2000. – Vol. 94. – P. 889–912.
15. **Соценко, О.В.** Компьютерная DLA-модель формирования шаровидного графита в высокопрочном чугунах / О.В. Соценко // *Металл и литье Украины*. – 2009. – № 9. – С. 3–9.
16. **Соценко, О.В.** Особенности агрегативного механизма формирования структуры шаровидного и вермикулярного графита в модифицированных чугунах / О.В. Соценко // *Металл и литье Украины*. – 2012. – № 12. – С. 3–9.
17. **Остроумова, Г.М.** Моделирование процесса нуклеации углеродных наноструктур: дис. ... канд. физ.-мат. наук / Г.М. Остроумова. – Долгопрудный, 2020.

REFERENCES

1. **Verkhovlyuk A.M., Shumikhin V.S., Nazarenko A.V.** Osobennosti rosta sharovidnykh vklyuchenij grafitu v chugune [Features of the growth of spherical graphite inclusions in cast iron]. *Processy lit'ya = Casting processes*, 2007, no. 5, pp. 11–18.
2. **Skaland T., Grong F., Grong T.** A model for the graphite formation in ductile cast iron. Part I. Inoculation mechanisms. *Metallurgical Transactions A*, 1993, vol. 24, pp. 2321–2345.
3. **Pokrovsky A.I.** Analiz himicheskogo sostava i morfologii grafitnykh vklyuchenij v vysokoprochnom chugune [Analysis of the chemical composition and morphology of graphite inclusions in high-strength cast iron]. *Sovremennye metody i tekhnologii sozdaniya i obrabotki materialov: sb. nauch. tr. v 2 kn. Kn. 1. Novye tekhnologii i materialy = Modern methods and technologies for creating and processing materials: collection. scientific tr. in 2 books. Book 1. New technologies and materials*. Minsk: FTI NAN Belarusi Publ., 2021, pp. 224–234.
4. **Stefanescu D.M.** Solidification and modeling of cast iron – a short history of the defining moments. *Materials Science and Engineering A*, 2005, vol. 413–414, pp. 322–333.
5. **Stefanescu D.M.** Modeling of cast iron solidification – the defining moments. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2005, vol. 38, no. 7, pp. 1433–1447.
6. **Stefanescu D.M.** State of the art in solidification modeling of cast iron. *Science and Processing of Cast Iron VIII*, 2006, pp. 32–41.
7. **Alonso G., Larranaga P., Stefanescu D.M., De la Fuente E., Natxiondo A., Suarez R.** Kinetics of nucleation and growth of graphite at different stages of solidification for spheroidal graphite iron. *International Journal of Metalcasting*, 2017, vol. 11, pp. 14–26.
8. **Ghassemali E., Hernando J.C., Stefanescu D.M. [et al.]** Revisiting the graphite nodule in ductile iron. *Scripta Materialia*, 2019, vol. 161, pp. 66–69.
9. **Stefanescu D.M.** The meritocratic ascendance of cast iron: from magic to virtual cast iron. *International Journal of Metalcasting*, 2019, vol. 13, iss. 4, pp. 726–752.
10. **Alonso G., Stefanescu D.M., Larranaga P., Suarez R.** Graphite nucleation in compacted graphite cast iron. *International Journal of Metalcasting*, 2020, vol. 14, pp. 1162–1171.
11. **Stefanescu, D.M.** Numerical micro-modeling of solidification / D.M. Stefanescu // *Science and Engineering of Casting Solidification*. Edited by D.M. Stefanescu. – Springer, Boston, MA, 2009, pp. 1–44.
12. **Catalina, A.V.** A new analytical approach to predict spacing selection in lamellar and rod eutectic systems / A.V. Catalina, S. Sen, D.M. Stefanescu // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2003. – Vol. 34, No. 2. – P. 383–394.
13. **Beltran-Sanchez, L.** A quantitative dendrite growth model and analysis of stability concepts / L. Beltran-Sanchez, D.M. Stefanescu // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2004. – Vol. 35, No. 8. – P. 2471–2486.

14. **Catalina, A. V.** Prediction of room temperature microstructure and mechanical properties in lamellar iron castings / A. V. Catalina, X. Guo, D. M. Stefanescu, L. Chuzhoy, M. A. Pershing // AFS Transactions. – 2000. – Vol. 94. – P. 889–912.
15. **Sotsenko O. V.** Komp'yuternaya DLA-model' formirovaniya sharovidnogo grafita v vysokoprochnom chugune [Computer DLA model of the formation of spheroidal graphite in high-strength cast iron]. *Metall i lit'e Ukrainy = Metal and casting of Ukraine*, 2009, no. 9, pp. 3–9.
16. **Sotsenko O. V.** Osobennosti agregativnogo mekhanizma formirovaniya struktury sharovidnogo i vermikulyarnogo grafita v modifitsirovannykh chugunah [Features of the aggregative mechanism of formation of the structure of spherical and vermicular graphite in modified cast irons]. *Metall i lit'e Ukrainy = Metal and casting of Ukraine*, 2012, no. 12, pp. 3–9.
17. **Ostroumova G. M.** Modelirovanie processa nukleatsii uglerodnykh nanostruktur: dis. ... kand. fiz.-mat. nauk [Modeling the nucleation process of carbon nanostructures: dis. ... cand. physics and mathematics sciences]. Dolgoprudny, 2020.