



УДК 621.7.016.2:669.13

Поступила 03.01.2017

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ НА ФАЗОВЫХ ГРАНИЦАХ В ВЫСОКОПРОЧНОМ ЧУГУНЕ ПРИ ГОРЯЧЕМ ВЫДАВЛИВАНИИ

## COMPUTER MODELING OF STRAINS ON PHASE BOUNDARIES IN DUCTILE CAST IRON AT HOT EXTRUSION

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

*В. А. КОВТУН*, Гомельский филиал университета гражданской защиты Министерства  
по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, г. Гомель, Беларусь,

*Т. В. РЯБЧЕНКО*, Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого  
НАН Беларуси, г. Гомель, Беларусь, ул. Кирова, 32а,

*И. Н. ХРОЛЬ*, Министерство промышленности Республики Беларусь, г. Минск, Беларусь,  
пр. Партизанский, 2, кор. 4

*A. I. POKROVSKY*, Physical-Technical Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,  
10, Kuprevicha str. E-mail: arturu@tut.by,

*V. A. KOVTUN*, The Gomel branch of University of civil defense of Emergency Situation Ministry of the  
Republic of Belarus, Gomel, Belarus,

*T. V. RYABCHENKO*, Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Gomel,  
Belarus, 32a, Kirova str.,

*I. N. KHROL*, Ministry of Industry of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus, 2, Partizanskiy ave.

Выполнено компьютерное моделирование распределения напряжений в структуре высокопрочного чугуна с феррито-перлитной матрицей и включениями шаровидного графита по мере увеличения степени деформации в условиях прямого горячего выдавливания. С использованием программной системы конечно-элементного анализа ANSYS получены численные значения напряжений на границах раздела фаз феррит-перлит, графит-феррит, а также внутри графитного включения. Проанализировано распределение напряжений в исследуемых структурах и обнаружены зоны локального увеличения напряжений.

Результаты моделирования сопоставлены с металлографическим анализом и фрактограммами. Полученные результаты могут быть использованы при прогнозировании зон разрушения в изделиях из чугуна.

The computer modeling of the strain distribution in the structure of ductile iron with ferrite-pearlite matrix and inclusions of spherical graphite dependence on increasing degree of deformation during direct hot extrusion was researched. Using a software system of finite-element analysis ANSYS the numerical values of the strains at the phase boundaries: ferrite-pearlite, graphite-ferrite and also inside the graphite inclusions were defined. The analysis of the strain distribution in the investigated structures was performed and local zones of increased strains were discovered.

The results of modeling are compared with metallographic analysis and fracture patterns. The obtained results could be used in the prediction of fracture zones in the cast iron products.

**Ключевые слова.** Горячая пластическая деформация, высокопрочный чугун, структура, металлическая матрица, включения графита.

**Keywords.** Hot plastic deformation, ductile iron, structure, metal matrix, inclusion of graphite.

### Введение

Высокопрочный чугун с включениями шаровидного графита и феррито-перлитной металлической основой можно рассматривать как структурно-неоднородный материал, элементами которого выступают включения графита, существенно отличающиеся по свойствам от основной матрицы [1, 2]. Характеристики литого чугуна не только хорошо изучены, до даже и регламентированы [3–5].

До недавнего времени считалось, что чугун – пластически недеформируемый, хрупкий материал. Но, поскольку литая структура чугуна не всегда соответствует современным повышенным требованиям машиностроения, в последние годы внимание исследователей привлекают различные новые нестандартные способы воздействий на структуру чугунов. Это, в частности, горячая пластическая деформация чугунной заготовки (при температурах 800–1000 °С), например, штамповкой, прокаткой или выдавливанием для получения конкретных машиностроительных изделий. За последние десятилетия удалось доказать, что в определенных температурно-силовых интервалах чугун поддается пластической деформации [6–10].

Для гетерогенных материалов, к которым относится чугун, принято считать, что способность их к формоизменению определяется реологическими свойствами как включений, так и металлической основы. Исходя из этого положения, у сплавов, содержащих более 2,14% углерода, способности к пластической деформации невелики. Это объясняется наличием в пластичной и мягкой (160–200 НВ) аустенитной матрице хрупких и малопластичных фаз: цементита или (и) графита. Цементит, в частности, имеет высокую твердость (более 800 НВ, или 900–1000 НВ) и практически нулевую пластичность. Графит характеризуется пониженной пластичностью и высокой хрупкостью, что обусловлено слоистым строением его кристаллической решетки.

В случае пластического деформирования подобных материалов наблюдается значительное перераспределение напряжений, их концентрация в локальных участках, приводящая при определенных значениях к разрушению. Очевидно, что от показателей напряжений зависит вероятность появления трещин. Знание локальных участков с концентрацией напряжений позволит заранее прогнозировать зоны разрушения, изучение изменения напряженного состояния поможет выбрать оптимальные параметры технологии изготовления деталей. Поэтому в случае получения изделий из чугуна пластическим формообразованием понимание характера распределения напряжений в поковке трудно переоценить.

**Цель работы** – исследовать распределение напряжений на модельной, элементарной ячейке высокопрочного чугуна, включающей одно и пять включений шаровидного графита при разной степени относительной деформации (20%, 40, 60, 80%); провести при достаточном уровне дискретизации модельно-теоретические исследования процесса их деформирования с оценкой возникающих напряжений и формоизменений структурных составляющих материала; выполнить ряд подтверждающих модели натурных экспериментов.

#### Объекты, материалы и методики исследования

Исследовали высокопрочный чугун марки ВЧ50 (ГОСТ 7293-85) следующего химического состава: 3,2–3,6% С; 1,7–2,1% Si; 0,5–0,7% Mn; 0,4–0,6% Ni, 0,04–0,06% Mg, до 0,08% Р и до 0,01% S.

Выплавку металла осуществляли в 150-килограммовой индукционной печи с последующим модифицированием магниевой лигатурой марки ФСМг7 (7% магния), которую вводили при температуре 1400–1450 °С. Разливку металла проводили в песчано-глинистые формы с последующим охлаждением до 700–800 °С, затем отливки извлекали и охлаждали на воздухе. Полученные заготовки круглого сечения обрабатывали на токарном станке. Готовые заготовки подвергали горячему деформированию методом прямого выдавливания через коническую матрицу по схеме всестороннего неравномерного сжатия, заключающегося в использовании противодействия определенного усилия на выходе прутка. Степень деформации варьировали от 20 до 80% посредством изменения диаметра исходной заготовки таким образом, чтобы вся номенклатура прутков, получаемых деформацией, имела одинаковый диаметр (12,5 мм).

Процесс деформирования проходил в несколько стадий: заготовки нагревали с помощью токов высокой частоты до 900–1000 °С, а затем помещали в штамп, деформировали и охлаждали на воздухе. Далее заготовки механически обрабатывали с целью получения образцов для проведения металлографического исследования и изучения различий в литой и деформированной структуре.

Одним из основных этапов в процессе компьютерного моделирования является правильное определение исходных параметров. Для расчета при компьютерном моделировании использовали следующие исходные данные:

1) модули упругости: шаровидный графит 75 МПа, металлическая матрица: феррит 170 ГПа и перлит 175 ГПа;

2) физическая плотность – шаровидный графит 2,26 г/см<sup>3</sup>, металлическая матрица: феррит 7,8 г/см<sup>3</sup> и перлит 8,0 г/см<sup>3</sup>;

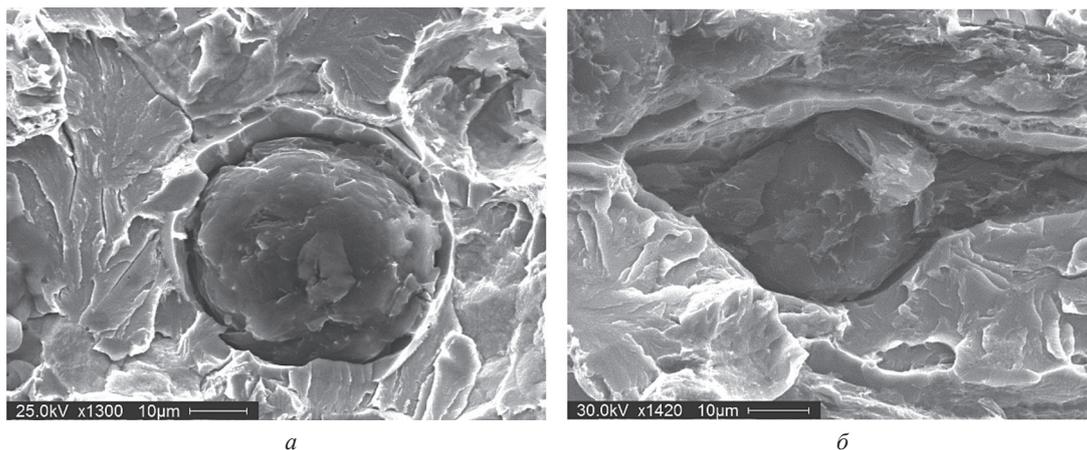


Рис. 1. Фрактограммы высокопрочного чугуна в литом состоянии (*а*) и после горячего выдавливания со степенью деформации 80%, продольное сечение (*б*)

3) коэффициент Пуассона – шаровидный графит 0,28, металлическая матрица: феррит 0,3 и перлит 0,28;

4) зависимость степени деформации от усилия: 20% – 30640 Н; 40% – 65125 Н; 60% – 159380 Н; 80% – 490595 Н.

### Результаты и их обсуждения

При создании компьютерной модели (размеры исходного включения) ориентировались на структуру металлической матрицы и размеры включений графита в реальных образцах. Основные структурные составляющие высокопрочного чугуна, их расположение и размеры приведены на рис. 1.

Анализируя поверхность чугуна в литом состоянии (рис. 1, *а*), можно отметить, что она имеет рельефный характер и достаточно неоднородна. Присутствуют весьма характерные участки, напоминающие древесный лист с темными плоскими участками и веерообразно расходящимися по ним светлыми прожилками. С большой вероятностью можно утверждать, что контуры так называемых «листьев» являются границами бывшего аустенитного зерна, а их внутреннее содержимое представляет собой пластинчатый перлит. Часто встречающиеся на поверхности «листа» плоские участки с однородной фактурой, своего рода фасетки или террасы (рис. 1, *а*) – это участки хрупкого разрушения, проходящего по пластинкам цементита. Светлые «прожилки в листе» – места вязкого разрушения ферритной составляющей перлита.

После прямого выдавливания со степенью деформации 80% (рис. 1, *б*) включение графита приобретает вытянутую эллипсообразную с вытянутыми отростками форму. Можно отметить, что ферритная оторочка вокруг включений графита практически отсутствует. Хрупкий характер излома металлической матрицы сохраняется аналогичным литому состоянию, что обусловлено присутствием цементитной составляющей перлита.

На основании предварительных металлографических исследований были рассмотрены возможные варианты получения компьютерной модели образцов из высокопрочного чугуна. Мы применили известный подход, позволяющий моделировать напряженно-деформированное состояние неоднородных материалов в мезомасштабе [11, 12], используя метод конечных элементов (МКЭ) [13, 14]. Метод предусматривает численное моделирование на ячейках периодичности или представительных объемах структуры и последующее усреднение на макроуровне.

Применение мезомеханического подхода (одним из вариантов реализации которого является метод конечных элементов) может быть использовано при анализе на прочность образцов высокопрочного чугуна после горячей пластической деформации.

Для оценки напряженно-деформированного состояния в образцах из чугуна при горячем выдавливании с разными степенями деформации разработаны 2D-структурные модели мезофрагмента чугуна. Размер мезофрагмента с одним включением шаровидного графита составлял 300×300 мкм. Диаметр включения шаровидного графита – 100 мкм. В реальном материале включения графита располагаются хаотично и нами был выбран мезофрагмент с пятью произвольно расположенными включениями шаровидного графита, размер которых составлял 700×700 мкм. При моделировании было принято, что вклю-

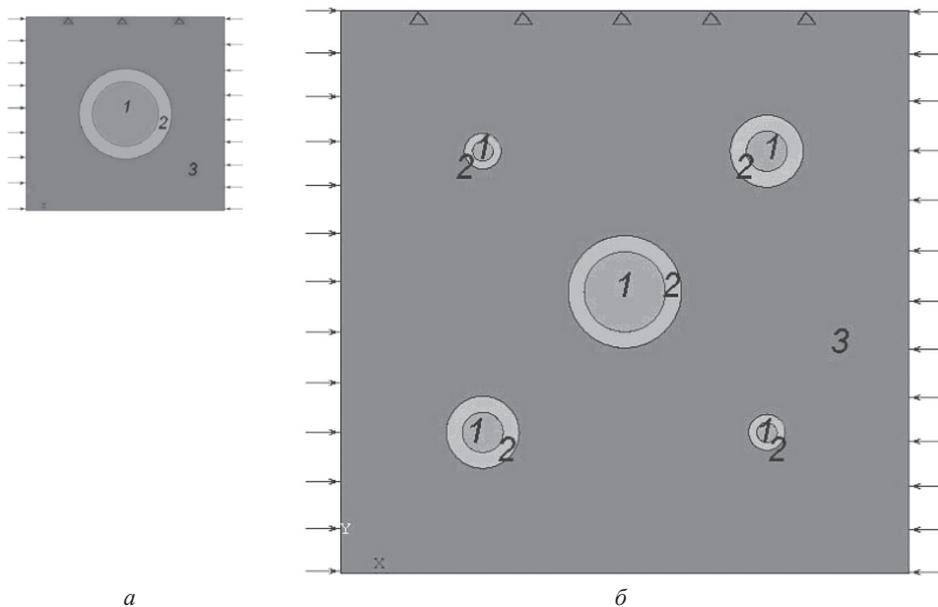


Рис. 2. Структурная модель мезофрагментов чугуна с одним (а) и пятью (б) включениями шаровидного графита, исследуемые при моделировании напряженно-деформированного состояния материала: 1 – шаровидный графит; 2 – феррит; 3 – перлит

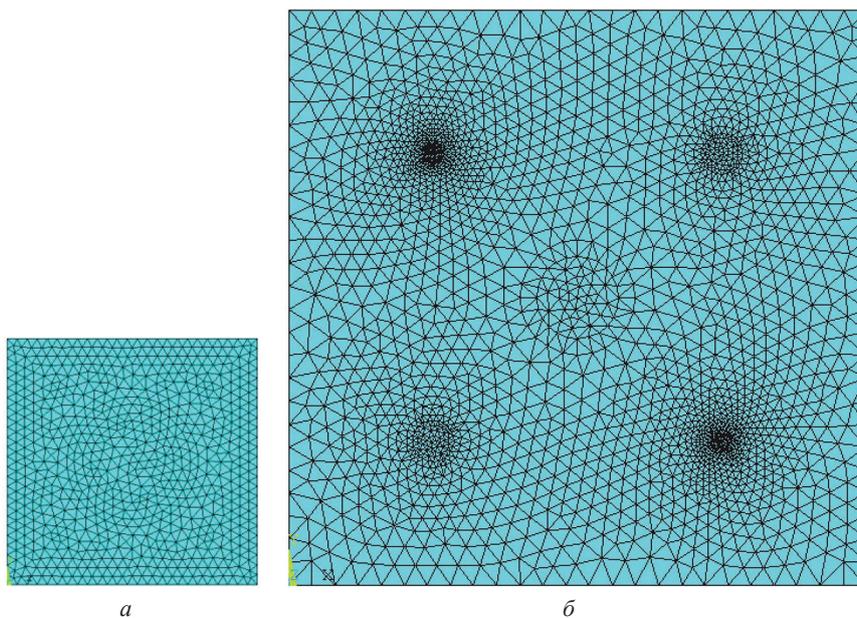


Рис. 3. Дискретизация мезофрагмента чугуна с одним (а) и пятью (б) включениями шаровидного графита конечными элементами

чения графита имеют правильную сферическую форму и их диаметр составляет 25, 50 и 100 мкм (рис. 2).

Для получения максимальной детализации результатов исследований была использована конечно-элементная аппроксимация на основе разбиения указанных выше компонентов материала двумерными (2D) элементами с автоматической генерацией сетки (рис. 3).

При дискретизации 2D-модели мезофрагмента чугуна использовали двумерный (2D) элемент (рис. 4).

Используемый элемент обеспечивает более точные результаты для смешанных сеток и допускает нерегулярную форму элемента без существенной потери точности. Данные элементы имеют совместные формы перемещений и пригодны для описания искривленных границ, обладают двумя степенями свободы в каждом узле: перемещения в направлении осей  $X$  и  $Y$  узловой системы координат. Элемент может использоваться в качестве плоского (при ис-



Рис. 4. Геометрия двумерного (2D) элемента, расположение узлов и системы координат элемента:  $I, J, L, K, M, N, O, P$  – узлы

следовании плосконапряженного или деформированного состояния) или асимметричного элемента. Также этот элемент имеет специальные возможности: пластичность, ползучесть, увеличение жесткости при наличии нагрузок, большие перемещения и большие деформации.

На основе разработанных моделей напряженно-деформированного состояния мезофрагментов высокопрочного чугуна с одним и пятью включениями шаровидного графита при разной степени деформации (20, 40, 60, 80%) проведены модельно-теоретические исследования процесса их деформирования с оценкой возникающих напряжений и формоизменений структурных составляющих материала.

Рассмотрим формоизменение включений шаровидного графита и напряженно-деформированное состояние мезофрагментов ВЧШГ (рис. 5). Как видно из рисунка, при максимальной степени деформации 80% происходит существенное сжатие включений шаровидного графита, вследствие того что более прочная перлит-ферритная матрица передает большую нагрузку на включение.

Результаты моделирования напряжений в случае одного и пяти включений графита в ячейке приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1. Изменение напряжений в мезофрагменте чугуна с одним включением шаровидного графита

Значение напряжения	Степень деформации, %			
	20	40	60	80
Максимальные эквивалентные по Мизесу $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ , ГПа	48,9	95,0	161,0	239,0
Максимальные касательные $\tau_{\text{ХУ}}$ , ГПа	13,5	26,3	44,5	66,0
Минимальные эквивалентные по Мизесу $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ , МПа	20,5	39,8	67,5	100,0
Минимальные касательные $\tau_{\text{ХУ}}$ , ГПа	1,1	2,2	3,7	5,5
На межфазной границе перлит-феррит $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ , ГПа:				
max	24,6	50,6	80,9	116
min	2,3	5,0	8,5	22,9
На межфазной границе феррит-графит $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ , ГПа:				
max	48,9	95,0	161,0	226,0
min	12,9	25,1	42,6	63,5
В центре включения шаровидного графита $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ , МПа	21,0	40,2	69,0	102,0

Таблица 2. Изменение напряжений в мезофрагменте чугуна с пятью включениями шаровидного графита

Значение напряжения	Степень деформации, %			
	20	40	60	80
Максимальные эквивалентные по Мизесу $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ , ГПа	55,5	110,0	187,0	273,0
Максимальные касательные $\tau_{\text{ХУ}}$ , ГПа	15,0	30,0	50,3	73,7
Минимальные эквивалентные по Мизесу $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ , МПа	24,3	48,0	81,7	120,0
Минимальные касательные $\tau_{\text{ХУ}}$ , ГПа»	1,6	3,1	5,3	7,7
На межфазной границе перлит-феррит $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ , ГПа:				
max	27,6	54,6	92,6	136,0
min	4,0	9,0	15,3	22,1
На межфазной границе феррит-графит $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ , ГПа:				
max	55,5	110,0	187,0	273,0
min	14,9	29,4	49,7	96,7
В центре включения шаровидного графита $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ , МПа:				
точка 1	25,2	49,7	84,6	124,0
» 2	25,4	50,1	85,6	125,0
» 3	24,8	48,9	83,3	122,0
» 4	25,5	50,5	86,0	126,0
» 5	25,2	49,7	84,6	124,0

Так как включения шаровидного графита расположены произвольно в перлит-ферритной матрице, существуют области, благоприятные и неблагоприятные для деформирования (при действии распределенной сжимающей нагрузки). По причине начальной неоднородности материала процесс пластического деформирования при действии распределенной сжимающей нагрузки начинается не по всему объему одновременно, а только в наиболее благоприятных локальных областях, в нашем случае в областях включений графита. Максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу наблюдаются в межфазных

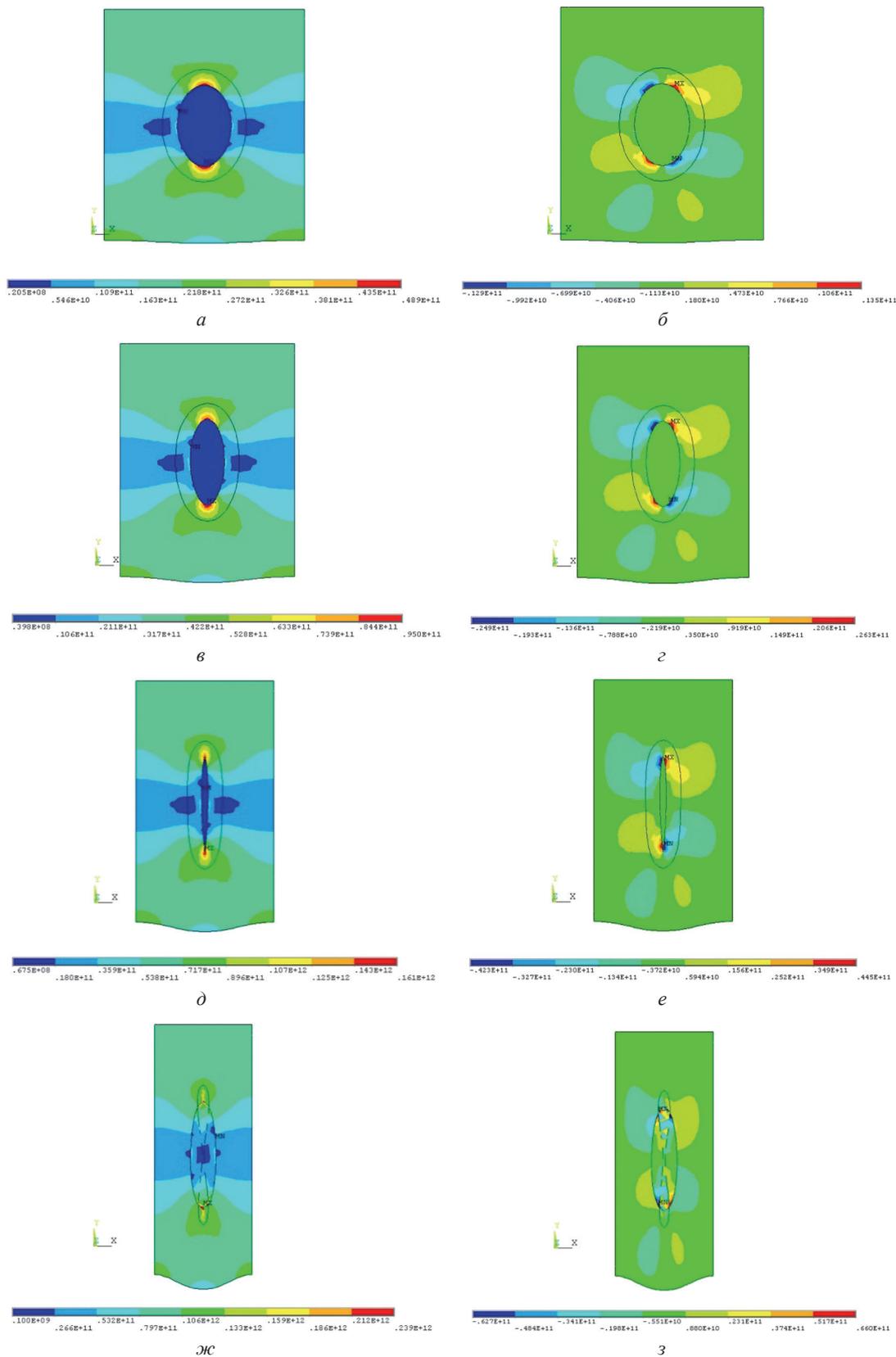


Рис. 5. Распределение эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{экв}}$  по Мизесу (*a* – 20%; *в* – 40; *д* – 60; *ж* – 80%) и касательных напряжений  $\tau_{xy}$  (*б* – 20%; *г* – 40; *е* – 60; *з* – 80%) в мезофрагменте ВЧШГ с одним включением шаровидного графита

областях включений графита и металлической матрицы и достигают наибольших значений более 230 ГПа. В центре включений шаровидного графита эквивалентные значения напряжений по Мизесу минимальны и составляют от 21 до 102,0 МПа в мезофрагменте ВЧШГ с одним включением шаровидного графита и от 24,8 до 126,0 МПа в мезофрагменте высокопрочного чугуна с пятью включениями шаровидного

графита. При этом происходит значительное формоизменение самих включений графита, которое наблюдается при наибольшей степени деформации. Также при увеличении содержания включений графита в металлической матрице исследуемого мезофрагмента, когда степень деформации высокопрочного чугуна составляет 80%, наблюдаются эффекты резкого изменения значений и знака касательных напряжений на противоположный. Согласно теории механики деформируемого твердого тела, это означает, что в данных областях возникает наибольшая вероятность образования структурных дефектов, например, таких, как микротрещины, а также возможно образование дефектов кристаллической решетки металла. Такая закономерность наблюдается как в мезофрагментах ВЧШГ, содержащих одно включение шаровидного графита, так и в мезофрагментах ВЧШГ с пятью включениями графита.

На основании полученных результатов можно оценить общий характер изменения напряжений в зависимости от степени деформации мезофрагмента ВЧШГ, который заключается в следующем. Максимальные эквивалентные напряжения наблюдаются на межфазных границах феррит-графит, а их значения увеличиваются от 48,9 до 226,0 ГПа в мезофрагменте ВЧШГ с одним включением шаровидного графита и от 55,5 до 273,0 ГПа в мезофрагменте ВЧШГ с пятью включениями шаровидного графита (табл. 2). Аналогичная тенденция увеличения значений эквивалентных напряжений наблюдается и на межфазной границе перлит-феррит, однако величина их практически в 2 раза меньше. Значения максимальных и минимальных эквивалентных напряжений, возникающих на межфазных границах феррит-графит и перлит-феррит, существенно отличаются (до 2–3 раз) (табл. 2). Следует отметить значительную разницу величин эквивалентных напряжений в зависимости от направления приложения сжимающей нагрузки (рис. 6).

Анализ результатов моделирования позволил установить, что изменение размера включения шаровидного графита в мезофрагменте ВЧШГ не оказывает существенного влияния на значение возникающего напряжения в центре включения. Однако при уменьшении диаметра включения шаровидного графита уменьшается значение эквивалентных напряжений на межфазной границе перлит-феррит. Также можно констатировать значительное увеличение напряжений (почти в 5 раз) при повышении степени деформации мезофрагмента высокопрочного чугуна от 20 до 80%.

Существенная концентрация напряжений наблюдается во всех областях мезофрагментов, примыкающих к включениям шаровидного графита. Поэтому большие перепады напряжений могут способствовать повышению вероятности возникновения структурных дефектов в данных зонах, что может приводить к разрушению материала. В реальном материале включения графита располагаются хаотично и плоскость разрушения может проходить по участкам с различным уровнем напряжений. В связи с этим могут наблюдаться случаи, когда образовавшаяся микротрещина по мере продвижения в глубину материала будет прерываться включениями графита, что, вероятно, может привести к торможению ее распространения.

Для сопоставления формы графита при моделировании на рис. 7 приведены реальные микроструктуры высокопрочного чугуна, подвергнутого деформации с различной степенью.

Следующим, вторым этапом работы была разработка 3D-структурных моделей мезофрагмента чугуна. Размер объемного мезофрагмента и исходные данные использовали те же, что и для 2D-модели.

Знания закономерностей, обуславливающих наличие в материале тех или иных свойств, дает возможность прогнозирования и управления характером развития деформационных процессов в структурных компонентах чугуна, а также позволят улучшить структуру чугуна после технологической обработки и выбрать оптимальные режимы технологической обработки.

На основе разработанных 3D-моделей напряженно-деформированного состояния мезофрагментов ВЧШГ с одним и пятью включениями шаровидного графита при разной степени деформации (20, 40, 60, 80%) при достаточном уровне дискретизации проведены модельно-теоретические исследования процесса их деформирования с оценкой возникающих напряжений и формоизменений структурных составляющих материала (рис. 8, 9).

По причине начальной неоднородности материала процесс пластического деформирования при действии распределенной сжимающей нагрузки начинается не по всему объему одновременно, а только в наиболее благоприятных локальных областях, в нашем случае в областях включений графита (рис. 10). Максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу наблюдаются в межфазных областях включений графита и металлической матрицы и достигают наибольших значений более 20,1 ГПа. В центре включений шаровидного графита эквивалентные значения напряжений по Мизесу минимальны и составляют 17,3 ГПа в мезофрагменте ВЧШГ с одним включением шаровидного графита и 19,1 МПа в мезофрагменте ВЧШГ с пятью включениями шаровидного графита. При этом происходит значительное формоизменение самих включений графита, которое наблюдается при наибольшей степени деформации

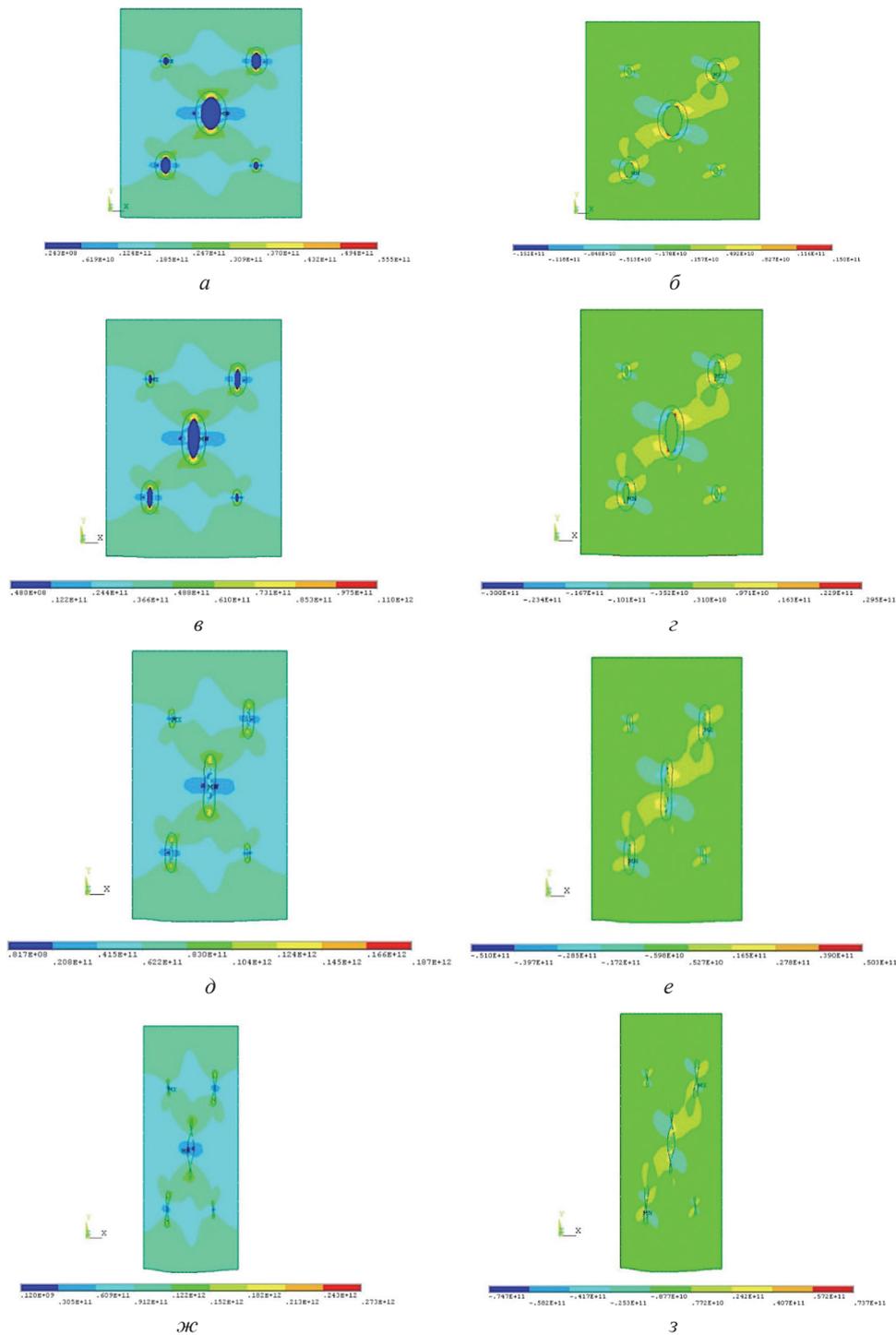


Рис. 6. Распределение эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{экв}}$  по Мизесу ( $a - 20\%$ ;  $в - 40\%$ ;  $д - 60\%$ ;  $ж - 80\%$ ) и касательных напряжений  $\tau_{xy}$  ( $б - 20\%$ ;  $г - 40\%$ ;  $е - 60\%$ ;  $з - 80\%$ ) в мезофрагменте ВЧШГ с пятью включениями шаровидного графита

(см. рис. 7, 8). Также при увеличении содержания включений графита в металлической матрице исследуемого мезофрагмента, когда степень деформации ВЧШГ составляет 80%, наблюдаются эффекты резкого изменения значений и знака касательных напряжений на противоположный. Согласно теории механики деформируемого твердого тела, это означает, что в данных областях возникает наибольшая вероятность образования структурных дефектов, например, таких, как микротрещины, а также возможно образование дефектов кристаллической решетки металла. Такая закономерность наблюдается как в мезофрагментах ВЧШГ, содержащих одно включение шаровидного графита, так и в мезофрагментах ВЧШГ, содержащих пять включений шаровидного графита.

На основании полученных результатов можно оценить общий характер изменения напряжений в зависимости от степени деформации мезофрагмента ВЧШГ. Вероятно, он заключается в следующем: мак-

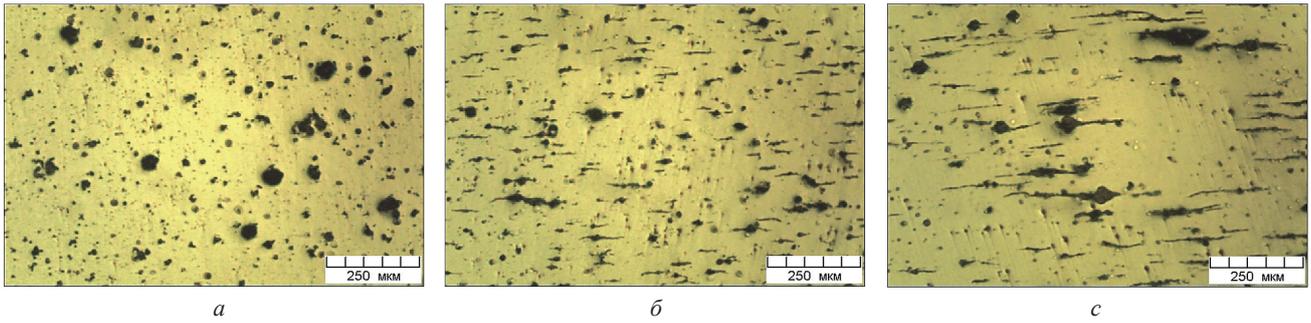


Рис. 7. Микроструктура высокопрочного чугуна ВЧ50 в продольном сечении при различной степени деформации: *a* – 20%; *б* – 60; *в* – 80%; не травлено.  $\times 100$

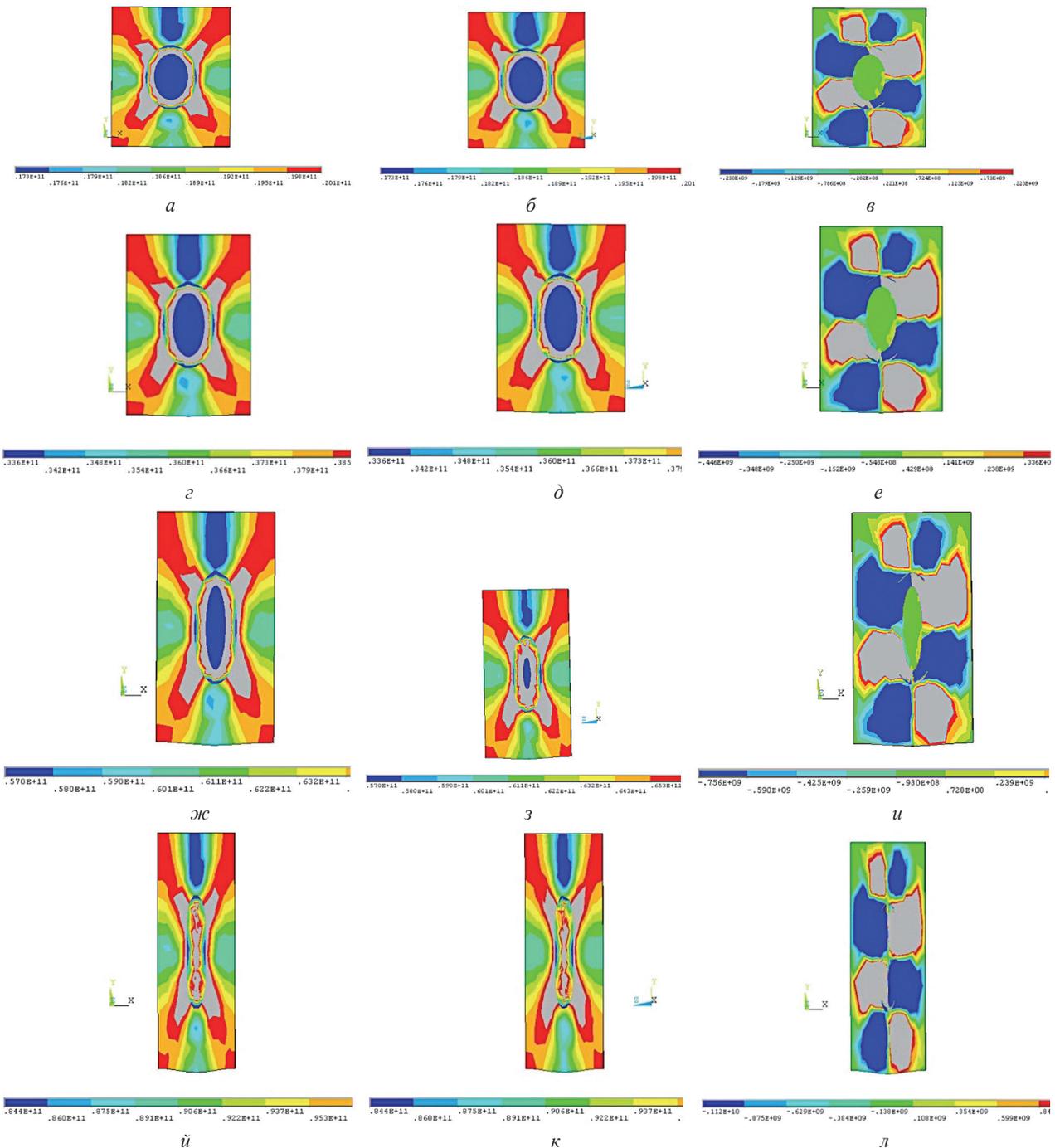


Рис. 8. Распределение эквивалентных напряжений  $\sigma_{экв}$  по Мизесу в сечении  $x-y$  (*a*, *г*, *ж*, *й*) и сечении  $y-z$  (*б*, *д*, *з*, *к*), касательных напряжений  $\tau_{xy}$  (*в*, *е*, *и*, *л*) в объемном мезофрагменте ВЧШГ с одним включением шаровидного графита; *a*–*в* – степень деформации 20%; *г*–*е* – 40; *ж*–*и* – 60; *й*–*л* – 80%

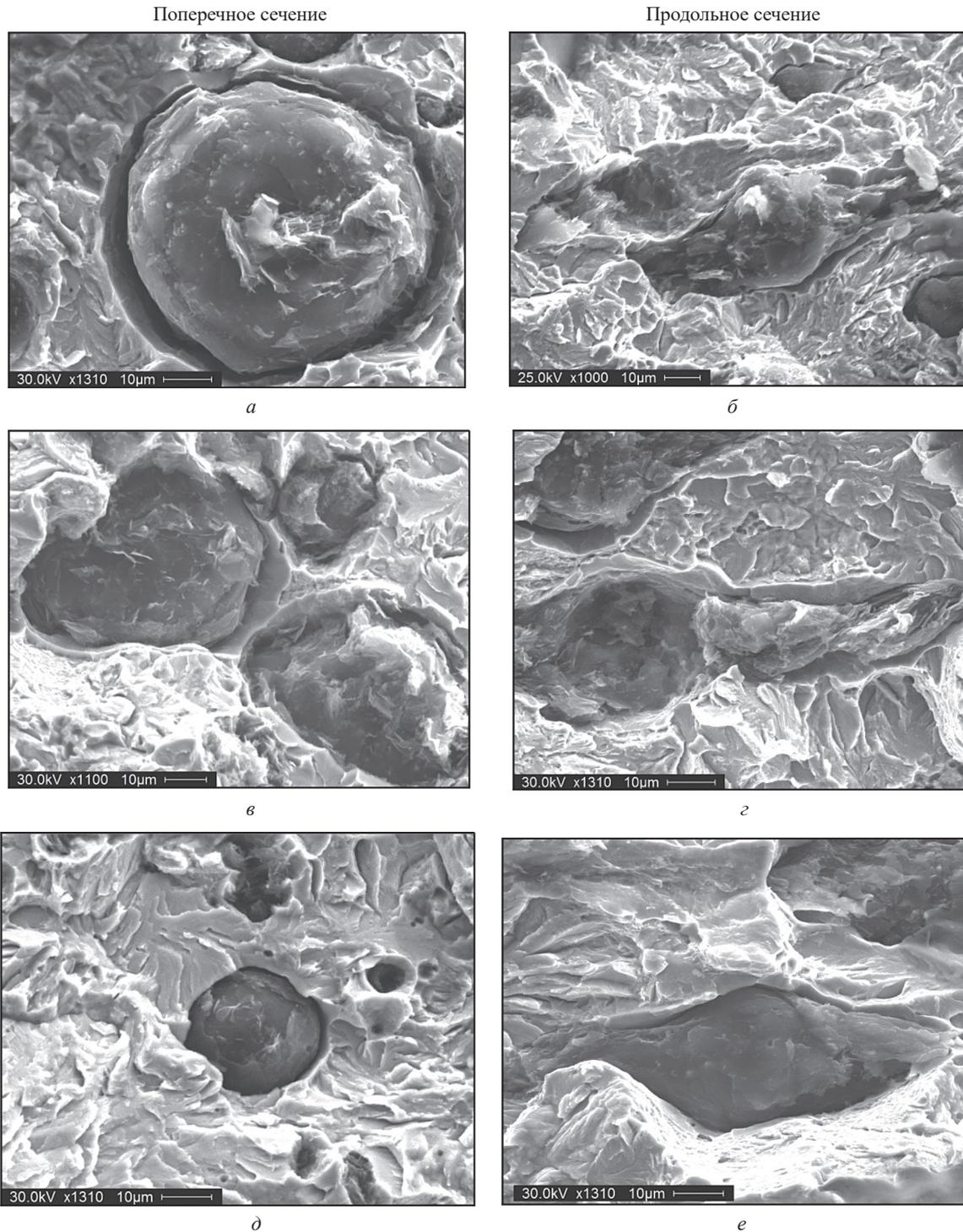


Рис. 9. Поверхность излома высокопрочного деформированного чугуна. Степень деформации 60%

симальные эквивалентные напряжения наблюдаются на межфазных границах феррит-графит и увеличиваются их значения от 17,6 до 86,0 ГПа в мезофрагменте ВЧШГ с одним включением шаровидного графита и от 19,2 до 94,1 ГПа в мезофрагменте ВЧШГ с пятью включениями шаровидного графита. Аналогичная тенденция увеличения значений эквивалентных напряжений наблюдается и на межфазной границе перлит-феррит. Следует отметить значительную разницу величин эквивалентных напряжений в направлении приложения сжимающей нагрузки.

Анализ результатов моделирования позволил установить, что изменение размера включения шаровидного графита в мезофрагменте ВЧШГ не оказывает существенного влияния на значение возникающего напряжения в центре включения. Можно констатировать значительное увеличение напряжений (почти в 5 раз) при увеличении степени деформации мезофрагмента ВЧШГ от 20 до 80%.

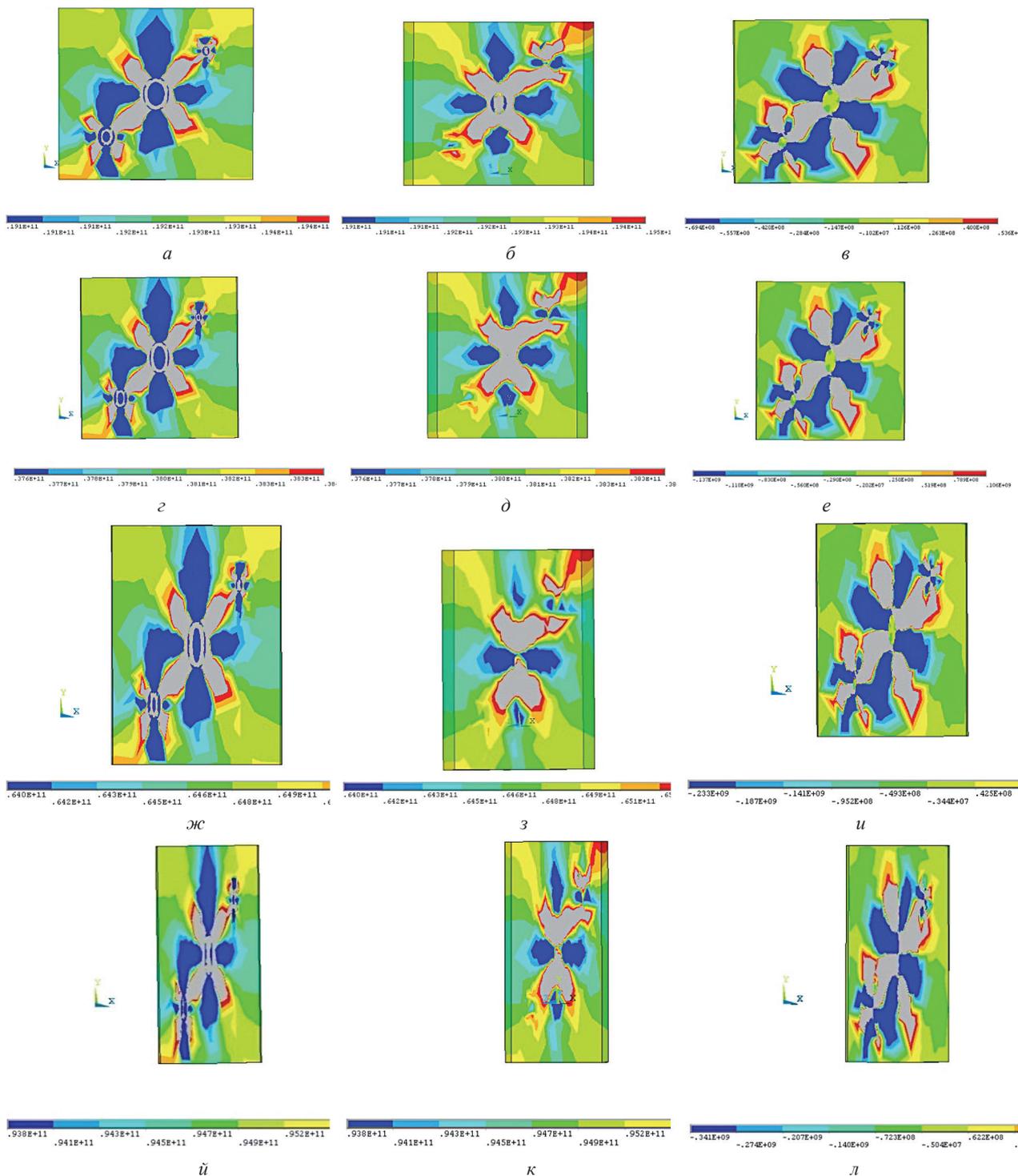


Рис. 10. Распределение эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{ЭКВ}}$  по Мизесу в сечении  $xy$  ( $a, z, ж, й$ ) и сечении  $yz$  ( $б, д, з, к$ ), касательных напряжений  $\tau_{xy}$  ( $в, е, и, л$ ) в объемном мезофрагменте ВЧШГ с пятью включениями шаровидного графита;  $a-в$  – степень деформации 20%;  $з-е$  – 40;  $ж-и$  – 60;  $й-л$  – 80%

Существенная концентрация напряжений наблюдается во всех областях мезофрагментов. В связи с тем, как и в случае с 2D-моделями, большие перепады напряжений могут способствовать повышению вероятности возникновения структурных дефектов в данных зонах, что может приводить к разрушению материала. В то же время, как было сказано выше, в реальном материале включения графита располагаются хаотично и плоскость разрушения может проходить по участкам с различным уровнем напряжений, а по мере продвижения в глубину материала микротрещины будет прерываться включениями графита.

Для контроля результатов компьютерного моделирования на рис. 9 приведены фрактограммы изломов чугунов в литом и деформированном состояниях. Можно отметить довольно значительное совпадение результатов изменения формы графита.

Результаты моделирования распределения напряжений в поперечном сечении (перпендикулярно линии течения металла) приведены на рис. 10.

### Выводы

Разработаны 2D- и 3D-мезомеханические модели структурного состояния мезофрагментов высокопрочного чугуна в литом состоянии с разным содержанием шаровидного графита с учетом исходных данных по свойствам структурных компонентов. Исследовано деформированное состояние 2D-модели мезофрагмента чугуна в процессе горячего выдавливания. Представлены результаты формоизменения и напряженно-деформированного состояния мезофрагментов чугуна с разным содержанием шаровидного графита и при разных степенях деформации (20, 40, 60 и 80%).

Разработанные модели мезофрагментов высокопрочного чугуна с включениями шаровидного графита позволяют исследовать влияние мезоскопического структурного уровня на процессы деформирования и закономерности пластического деформирования включений, а также определять уровень возникающих внутренних напряжений в зависимости от степени деформации исходного мезофрагмента.

Из представленных показателей видно, что максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу возрастают по мере увеличения степени деформации почти в пять раз – до 273 ГПа. Такой же характер изменения напряжений наблюдается и на межфазной границе феррит-графит.

Что касается механизма пластической деформации графита, то можно предположить, что она происходит за счет сдвига по параллельным плоскостям. Как известно, атомы углерода в графите в базисных (наиболее плотно упакованных) плоскостях располагаются в углах правильных шестиугольников. Расстояние между атомами, находящимися в одной плоскости, составляет 0,1415 нм, расстояние между слоями – 0,33544 нм, т. е. в 3 раза больше. Известно также, что энергия связи между слоями гексагонального графита составляет 16,7 Дж/моль, а энергия связи между атомами углерода в слое на порядок больше – 167,6 Дж/моль. Существенная разница в энергиях связи обеспечивает легкую подвижность слабо связанных между собой слоев. Поскольку пластическая деформация происходит за время не более 1 с (столько длится процесс выдавливания), можно предположить, что она осуществляется путем сдвига целых слоев графита, после чего возникают новые связи между атомами в соседних слоях и сплошность включения сохраняется.

Нужно признать, что моделирование деформации на мезоуровне предполагает учет не только взаимного расположения и формы включений, но и механизмов деформации: скольжение дислокаций, зернограничное проскальзывание, возникновение потоков точечных дефектов, динамическую рекристаллизацию и др. В данной работе все эти факторы не учтены. Поэтому рассмотрение материала в настоящей статье в большей мере можно отнести к феноменологическим подходам.

Также можно отметить, что при всех своих достоинствах компьютерное 3D-моделирование элементов структуры высокопрочных чугунов в литом и деформированном состояниях является лишь некоторым небольшим дополнением к практическим экспериментам.

Некоторыми другими перспективными приложениями методики 3D-моделирования элементов структуры литых чугунов являются, во-первых, возможность исследования напряженно-деформированного состояния как в объеме, так и на поверхности материалов; во-вторых, исследование деформации и напряжения внутренней структуры не только после снятия приложенной нагрузки (как в данном исследовании), но и в процессе приложения нагрузок.

### Литература

1. **Fundamentals** of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach / William D. Callister, David G. Rethwisch // Technology & Engineering, New York, 2012. 910 p.
2. **Hans Berns, Werner Theisen. Eisenwerkstoffe.** Stahl und Gusseisen. Bochum: Springer, 2008. 417 s.
3. **Бунин К. П., Малиночка Я. Н., Таран Ю. Н.** Основы металлографии чугуна. М.: Металлургия, 1969. 416 с.
4. ГОСТ 7293-85. Чугун с шаровидным графитом для отливок. Марки.
5. Чугун: Справ. изд. / Под ред. А. Д. Шермана, А. А. Жукова. М.: Металлургия, 1991. 576 с.
6. **Покровский А. И.** Горячая пластическая деформация чугуна: структура, свойства, технологические основы. Минск: Беларуская навука, 2010. 256 с.
7. **Pokrovskii A. I., Chau A. S., Kunovskii E. B.** Effect of the shape of graphite inclusions on acoustic characteristics of articles from cast and deformed iron // Metal Science and Heat Treatment (изд. Springer). 2011. Vol. 53, no. 7–8. P. 311–317.
8. **Chau A. S., Sojka J., Pokrovskii A. I.** // **The Physics of Metals and Metallography** (изд. Springer). 2013. Vol. 114, no. 1. P. 85–94.

9. **Покровский А. И.** Пластическое течение включений цементита и графита при обработке давлением чугуна // *Литье и металлургия*. 2013. № 1 (69). С. 88–95.
10. **Белов А. Х., Клейнер М. К., Карпов В. П.** Определение уровня деформируемости графитовых включений в чугуне с шаровидным графитом // *Совершенствование производства сантехнического оборудования*. 1987. Вып. 62. М.: НИИ сантех. С. 55–61.
11. **Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов** / Под ред. В. Е. Панина. Новосибирск: Наука, 1995. Т. 1. 298 с., Т. 2. 320 с.
12. **Панин В. Е., Лихачев В. А., Гриняев Ю. В.** Структурные уровни деформации твердых тел. Новосибирск: Наука, 1985. 232 с.
13. **Bathe Klaus-Jurgen.** Finite Element Procedures. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1996. 1037 p.
14. **Галлагер Р.** Метод конечных элементов. Основы: Пер. с англ. М.: Мир, 1984, 428 с.

### References

1. **Callister W. D., Rethwisch D. G.** *Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2012. – 910 p.
2. **Berns Hans, Theisen Werner.** *Eisenwerkstoffe. Stahl und Gusseisen*. Bochum: Springer, 2008. 417 p.
3. **Bunin K. P., Malinochka Ya. N., Taran Yu. N.** *Osnovy metallografii chuguna* [Fundamentals of metallography of cast iron]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1969. 416 p.
4. **Mezhgosudarstvennyy standart GOST 7293-85.** Chugun s sharovidnym grafitom dlya otlivok. Marki [Intergovernmental Standard GOST 7293-85. Spheroidal graphite iron for casting. Grades].
5. **Chugun:** Sprav. izd. [Cast Iron: A Handbook]. Ed. by A. D. Sherman, A. A. Zhukov. Moscow, Metallurgiya Publ., 1991. 576 p.
6. **Pokrovskiy A. I.** *Goryachaya plasticheskaya deformatsiya chuguna: struktura, svoystva, tekhnologicheskie osnovy* [Hot Plastic Deformation of Cast Iron: Structure, Properties, Technology Basics]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2010. 256 p.
7. **Pokrovskiy A. I., Chaus A. S., Kunovskii E. B.** Effect of the shape of graphite inclusions on acoustic characteristics of articles from cast and deformed iron. *Metal Science and Heat Treatment (Springer)*. 2011, vol. 53, no. 7–8, pp. 311–317.
8. **Chaus A. S., Sojka J., Pokrovskiy A. I.** Effect of hot plastic deformation on microstructural changes in cast iron with globular graphite. *The Physics of Metals and Metallography (Springer)*. 2013, vol. 114, no. 1. pp. 85–94.
9. **Pokrovskiy A. I.** *Plasticheskoe techenie vklyuchenij cementita i grafita pri obrabotke davleniem chuguna* [Plastic flow of cementite and graphite impurities at processing by cast iron pressure]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2013, no. 1 (69), pp. 88–95.
10. **Belov A. H., Klejner M. K., Karpov V. P.** *Opreделение urovnya deformiruемости grafitovykh vklyuchenij v chugune s sharovidnym grafitom* [Determination of the deformability level of graphite inclusions in cast iron with nodular graphite]. *Sovershenstvovanie proizvodstva santekhnicheskogo oborudovaniya = Operation improvement in plumbing equipment*, 1987, vyp. 62, pp. 55–61.
11. **Fizicheskaya mezomekhanika i komp'yuternoe konstruirovaniye materialov** [Physical Mesomechanics and Computational Design of Materials]. Ed. by V. E. Panin. Novosibirsk, Nauka Publ., 1995, Vol. 1, 298 p., Vol. 2, 320 p.
12. **Panin V. E., Lihachev V. A., Grinyaev Yu. V.** *Strukturnye urovni deformatsii tverdykh tel* [Structural Level of Deformation of Solids]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1985, 232 p.
13. **Bathe K.-J.** Finite Element Procedures. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1996, 1037 p.
14. **Gallagher R. H.** *Metod konechnykh elementov. Osnovy* [Finite Element Analysis. Fundamentals]. Moscow, Mir Publ., 1975, 428 p.