



УДК 621.77.01: 004.942

Поступила 20.10.2014

А. И. ПОКРОВСКИЙ, Физико-технический институт НАН Беларуси,
П. Е. ЛУЩИК, УП «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ЧУГУНА ПРИ ГОРЯЧЕМ ВЫДАВЛИВАНИИ

Теоретически и экспериментально на основе компьютерного моделирования, металлографического и электронно-микроскопического анализа изучены особенности структурообразования на образцах из высокопрочного чугуна, подвергнутых горячему выдавливанию по прямой схеме с различными степенями деформации (ϵ). Исследован характер изменения формы графитных включений по мере увеличения ϵ и численно промоделировано напряженно-деформированное состояние структурных составляющих чугуна. Доказано, что графитные включения в чугуне деформируются пластически и не разрушаются даже при больших степенях деформации (до 80–90%). Впервые представлена морфология поверхности деформированных графитовых включений, полученная методом сканирующей электронной микроскопии.

The specific features of structure formation of high-strength cast iron subjected to direct extrusion with different strain (ϵ) are studied both theoretically (by computer modeling) and experimentally (by metallographic analysis using light and electron microscopes). Evolution of the shape of graphite inclusions with increasing ϵ is examined and the stress-strain state in the vicinity of the graphite inclusion/metal matrix interface is modeled numerically. It is shown that graphite inclusions in the cast iron are deformed plastically even at high strains, up to 80–90%. Scanning electron microscopy has revealed the surface morphology of the deformed graphite inclusions.

Введение

Большинство металлических материалов, используемых в современной промышленности, являются многофазными, а многие из них еще и гетерогенными, т. е. содержащими в структуре весьма разнородные по характеристикам структурные составляющие. Классическим примером из известных материалов является чугун, представляющий собой многофазную и многокомпонентную систему, составляющие которой можно целенаправленно изменять, получая при этом широкий спектр состояний структуры и свойств. Основные требования к структуре машиностроительных изделий из чугуна, сложившиеся на сегодняшний день [1], сводятся к отсутствию выделений крупных конгломератов избыточных фаз (служащих концентраторами напряжений), наличию мелкозернистости металлической матрицы, равномерности распределения избыточных фаз по объему твердого раствора.

Поскольку литая структура чугуна не всегда соответствует современным повышенным критериям, в последние годы внимание исследователей привлекают различные новые нестандартные способы воздействий на структуру чугунов. Это, в част-

ности, горячая пластическая деформация чугунной заготовки (при температурах 800–1000°C), например, штамповкой, прокаткой или выдавливанием для получения конкретных машиностроительных изделий [2, 3].

Для гетерогенных материалов, к которым относится чугун, принято считать, что способность их к формоизменению определяется реологическими свойствами как включений, так и металлической основы [4]. 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 [5–7]. Поэтому до относительно недавнего времени считалось, что чугун – пластически недеформируемый, хрупкий материал.

Однако за последние десятилетия удалось доказать, что в определенных температурно-силовых интервалах чугун поддается пластической деформации [8]. С ее помощью можно не только придать изделию точную форму и устранить ряд литейных дефектов, но и успешно формировать требуемую микроструктуру [9], а также добиться существенного увеличения физико-механических, триботехнических и эксплуатационных характеристик по сравнению с литым состоянием, например, снизить уровень шума при работе шестерен [10]. Были проведены сравнительные исследования пластичности различных классов чугунов, а также температурных интервалов деформирования; начато изучение основных процессов структурообразования под действием деформирования и соответствующих им изменений физико-механических свойств [11].

Вместе с тем, в настоящее время сложилась в основном прикладная направленность исследований по деформированию чугуна. Нацеленность на получение конкретных деталей привела к тому, что в работах преобладает идеология придания изделию в первую очередь точной формы в ущерб углубленным материаловедческим исследованиям, а формирующуюся структуру чугуна рассматривают, как нечто вторичное. Предлагая способ деформации, исходят главным образом из возможности использования оборудования с наименьшими усилиями и числом штамповочных переходов. Такой подход приводит к точному соблюдению геометрических размеров поковки, однако потенциал структур (и соответственно свойств) деформированного чугуна раскрывается далеко не полностью.

В связи с этим актуально использование методов компьютерного моделирования структурообразования деформированного чугуна. Во-первых, потому, что деформирование приводит к образованию достаточно сложных структур как металлической матрицы, так и весьма необычной формы у графита. Во-вторых, компьютерное моделирование позволяет, не проводя большого числа плавов и экспериментов, спрогнозировать получаемую структуру, напряженное состояние, свойства, опасные зоны возможного разрушения при дальнейшей эксплуатации. Моделирование дает возможность предвидеть получаемую форму и расположение графитных включений, степень деформируемости конкретных включений, численно определить напряженно-деформированное состояние на границе между включениями и металлической матрицей.

Моделированием структурообразования чугунов в процессах деформирования начали заниматься несколько десятилетий назад. В работе [12] показано, что включения графита деформируются

дифференцированно, например, при горячей осадке в структуре встречаются как слабо-, так и сильно-деформированные графитные включения. Доказано, что включения графита деформируются в меньшей степени, чем металлическая матрица. Предложен метод определения деформируемости графитных включений в чугуне, основанный на совмещении метода координатных сеток и стереологического анализа. Однако в данной работе методы компьютерного моделирования, которые позволили бы усовершенствовать проведенные исследования, не использовались.

В работе [13] на образцах из высокопрочного чугуна после продольной прокатки с использованием системы проектирования «Компас» сделана попытка искусственного создания репродуцированного облика графитных включений (их расположения и ориентации) с последующим монтажом в 3D-модель. Однако этот подход использовал чисто конструкторские методы проектирования без учета температуры и многих важнейших физических характеристик графита и металлической матрицы, таких, как модуль упругости, коэффициент Пуассона, теплопроводность, относительное удлинение и сжатие, прочностные характеристики. В работе [14] исследовали напряженно-деформированное состояние по Мизесу высокопрочного чугуна после его горячего выдавливания. Построены модели структуры для деформирования в горячем состоянии для случаев одного, трех и пяти графитных включений, располагающихся в ячейке аустенитной матрицы. Авторам удалось сделать определенный шаг вперед в компьютерном моделировании, однако не было учтено, то что графит ведет себя не как упругое тело, а пластически деформируется, кроме того, полученные численные значения напряжений оказались слишком высокими и слабо согласуются с реальными данными.

Таким образом, исследования напряженно-деформированного состояния и структуры чугунов в зависимости от степени деформации остаются по-прежнему актуальными.

Цель настоящей работы – комплексные теоретические и экспериментальные исследования (компьютерным моделированием на микро- и мезоуровнях, металлографические и электронно-микроскопические) особенностей структурообразования и напряженно-деформированного состояния образцов из высокопрочного чугуна, подвергшихся горячему выдавливанию с различными степенями деформации.

Методики моделирования

Теоретически такие материалы, как деформированный чугун, можно рассматривать как компо-

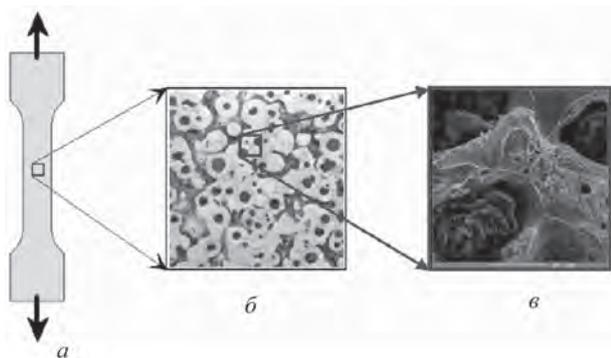


Рис. 1. Примеры масштабов (уровней) для компьютерного анализа характеристик высокопрочного чугуна: *a* – макроуровень (на примере образца для испытаний на растяжение. $\times 2$); *b* – мезоуровень (микроструктура при $\times 100$); *в* – микроуровень (электронно-микроскопическое изображение поверхности при $\times 5000$)

зиты. Каждая составляющая материала в свою очередь также является неоднородной в несколько меньшем масштабе. Такое разделение на уровни общепринято в литературе [15], причем визуально можно представить в виде, показанном на рис. 1.

Исследование характеристик свойств и поведения материалов при различных видах обработки (ковка, термическая обработка и др.) целесообразно проводить на разных уровнях, учитывая все особенности строения материала, его наследственности, внешних условий, технологического процесса и прочих факторов, влияющих на получение конечного изделия. Только комплексный анализ на всех уровнях может дать ответ о причинах появления дефектов в изделиях после их обработки.

Решить данную задачу на микро- или мезоуровне возможно с использованием методов численного моделирования. При этом можно получить необходимую информацию о локальных напряжениях или концентрации деформации в малом масштабе для объяснения нелинейных явлений, таких,

как усталость или трещинообразование, которые невозможно объяснить с точки зрения средних напряжений на макроуровне.

За последние годы уже был проведен ряд исследований поведения различных включений в металлической матрице с использованием компьютерного моделирования [16–20], большинство из которых посвящены анализу поведения неметаллических включений в стали. А. А. Миленин [16], К. Н. Im и С. К. Н. Dharan [19] использовали метод конечных элементов для анализа распределения деформаций вокруг включения. R. D. Thomson и J. W. Hancock [18] провели осесимметричный анализ деформации жесткого сферического включения в упругопластической матрице на основе степенного закона упрочнения. В контексте нашего исследования по деформированию чугуна интересны работы Pietrzyk, M., J. Kusiak, H. Kusiak и F. Grosman [17], а также А. А. Миленина [16], которые исследовали влияние формы включений при больших степенях пластических деформаций.

Определенный вклад в моделирование структур высокопрочного чугуна внесла работа Luca Collini [15], в которой предложен подход для анализа напряжений в высокопрочном чугуне на мезоуровне. Автор разработал модель микроструктуры чугуна с шаровидным графитом как периодическую ячейку с графитным включением в центре (рис. 2).

Однако недостаток работы [15] состоит в том, что автор свел вычисления к двумерной задаче (для сокращения трудозатрат и машинного времени). Кроме того, анализ проводился для холодного состояния (а на практике деформация чугуна при комнатных температурах трудноосуществима), в расчетах использованы только малые степени деформирования, не вычислено взаимное влияние графитных включений.

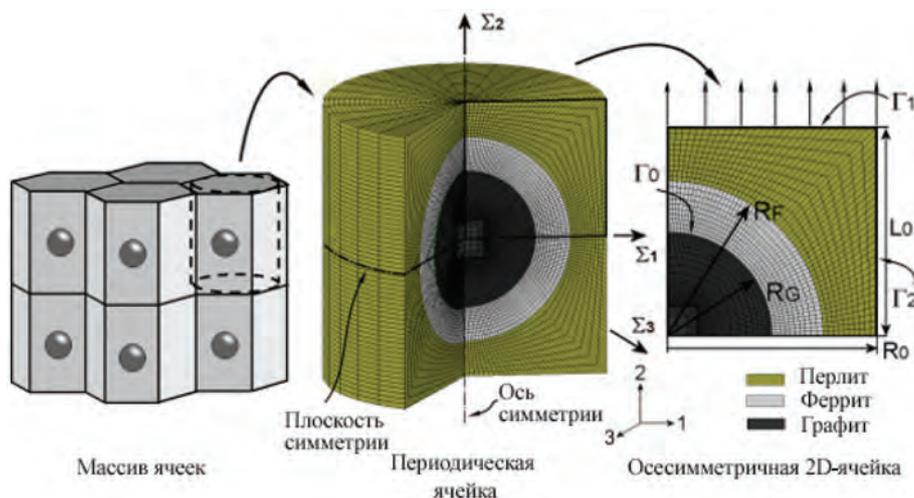


Рис. 2. Схема периодической ячейки с одним графитным включением [15]

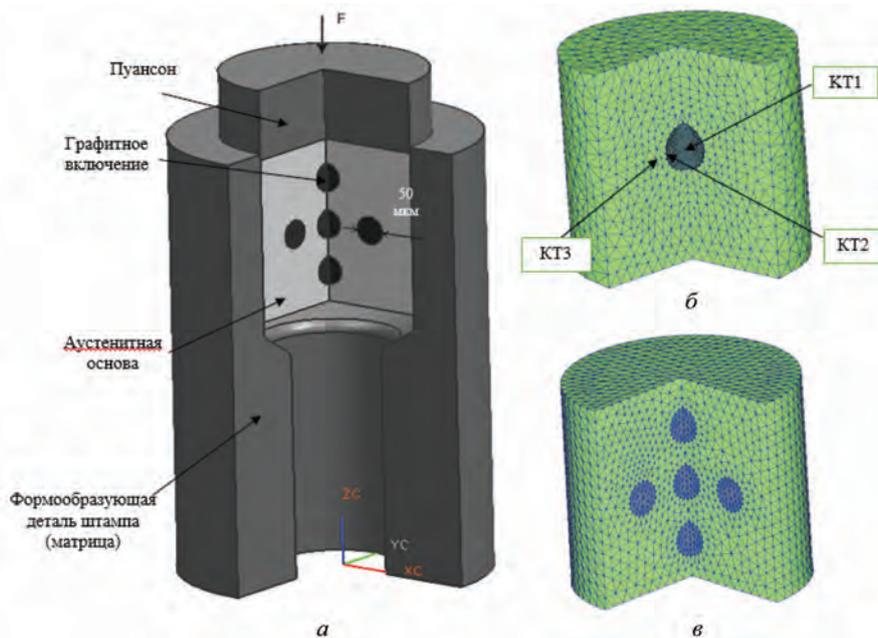


Рис. 3. *а* – схема процесса одноосного сжатия цилиндрических образцов с включениями графита; *б* – конечно-элементная сетка системы «аустенитная матрица – одно графитное включение»; *в* – конечно-элементная сетка системы «аустенитная матрица – несколько графитных включений»

Таким образом, анализ достижений в области численного анализа поведения включений в металлической матрице показал, что, несмотря на проведение большинства расчетов в двухмерном пространстве, наилучшим методом для исследования напряженно-деформированного состояния чугунов на микро- и мезоуровне является метод конечных элементов.

В настоящей работе с использованием численного моделирования процесса одноосного сжатия (в условиях выдавливания цилиндрической заготовки через конусную матрицу с отверстием круглого диаметра – рис. 4, *а*) цилиндрических образцов из высокопрочного чугуна с включениями графита (одним или несколькими) исследовали влияние степени деформации (35, 60, 80 и 95%) на изменение формы графитных включений и перераспределение напряжений в структуре (металлической матрице и графитных включениях).

Модель процесса, исходные данные, материалы, граничные условия

Процесс одноосного сжатия цилиндрических образцов чугуна с включениями графита моделировали на основе метода конечных элементов. Разработку электронных моделей мезофрагмента системы «аустенитная матрица – одно (несколько) графитных включений» проводили с использованием системы компьютерного проектирования NX 8.5 и набора средств моделирования технологических процессов Visual-Environment 9.6. Модель представляла собой периодическую ячейку с графитными включениями в центре.

Схема процесса, а также конечно-элементная сетка системы «аустенитная матрица – одно (несколько) графитных включений» приведены на рис. 3. Диаметр графитных включений был выбран наиболее часто встречающимся в реальной практике и составлял 50 мкм, что соответствовало обозначению ШГд45 по ГОСТ 3443-87.

Все элементы штампа, в том числе ключевые, пуансон, контейнер и матрица задавали абсолютно жесткими. Модели деформированных материалов были заданы упруговязкопластическими. Учитывалось общепринятое положение, что соотношение, определяющее состояние материала в области пластического деформирования, представляет собой функциональную зависимость напряжений пластического течения материала (предела текучести) от текущего значения пластической деформации и скорости деформации. Эта зависимость рассматривалась в изотермической постановке для фиксированного начального значения температуры.

Конкретные параметры электронной модели процесса (начальные и граничные условия, свойства материалов, размеры конечно-элементной сетки) приведены в таблице. Механические свойства аустенита и графита при температуре 1000 °C задавались исходя из данных, полученных на основе литературного анализа отечественных и зарубежных источников [20 – 22], а также свойств, взятых в базе данных Visual-Environment 9.6.

При проведении численного анализа в электронной модели был принят ряд допущений и упрощений:

Конкретные параметры электронной модели процесса, принятые в настоящей работе

Начальные параметры конечно-элементной сетки	
Параметр	Значение
Количество КЭ для ГВ (1 / 7 включений)	6600 / 3800 (для каждого)
Размер ребра КЭ (мм) ГВ (1 / 7 включений)	0,0014 / 0,0025
Количество КЭ для АМ (1/7 включений)	19180 / 17300
Размер ребра КЭ (мм) АМ (1/7 включений)	0,006 / 0,006
Начальные и граничные условия	
Температура АМ и ГВ, °С	1000
Температура элементов штампа, °С	400
Усилие, т	100
Коэффициент трения между АМ и ГВ	0,3
Начальные свойства материалов	
Модуль упругости, ГПа (АМ/ГВ)	120 / 90
Коэффициент Пуассона (АМ/ГВ)	0,3 / 0,2
Коэффициент теплового расширения (АМ/ГВ)	$1,2 \cdot 10^{-5} / 7,5 \cdot 10^{-6}$
Напряжение пластического течения	Функциональные зависимости на основе литературных данных из [20 – 22]

Примечание. КЭ – конечный элемент; ГВ – графитное включение; АМ – аустенитная матрица.

1. Расчет проводили для сегмента модели в виде 1/4 доли цилиндра (с наложением граничных условий симметрии).

2. Так как в данном малом объеме ячейки градиент температуры незначителен и скорость процесса очень велика, расчет проводили для фиксированного значения температуры без учета теплопередачи между металлической основой и элементами штампа.

3. Коэффициент трения между металлической основой чугунной заготовки и элементами штампа принимали близкий к нулю.

Методики получения чугунных заготовок и их деформирования в реальных условиях. Методики исследований структуры

Плавку высокопрочного чугуна марки ВЧ50 вели в индукционной высокочастотной печи емкостью 150 кг с кислой футеровкой по известной технологии. В качестве шихтовых материалов использовали чушковый чугун, стальной лом и ферросплавы. Для получения шаровидной формы графита жидкий металл модифицировали в ковше лигатурой ФСМг7К03, а для вторичного модифицирования использовали ферросилиций ФС75. Разливку осуществляли в песчано-глинистые формы. Отливки представляли собой прутки диаметром 35 мм и длиной 150 мм.

Для деформирования выбрали схему неравномерного всестороннего сжатия, которую реализовали при горячем выдавливании. Температура деформации составляла 900–1000°С. Применяли индукционный нагрев, общее время которого не превышало 50–90 с. Выдавливание проводили на серийном кривошипном прессе марки К2130 уси-

лием 100 т в специальной оснастке, принципиальная схема которой показана на рис. 4 [23].

Нагретую заготовку 4 помещали в подогретый до 400 °С контейнер штампа 2 и сверху устанавливали вкладыш из электродного графита 3. При движении пуансона 1 вниз графитный вкладыш разрушался, превращаясь в порошок, который заполнял зазор между заготовкой и контейнером. Использование графита позволяло улучшить смазку, ликвидировать пресс-остаток, уменьшить не-

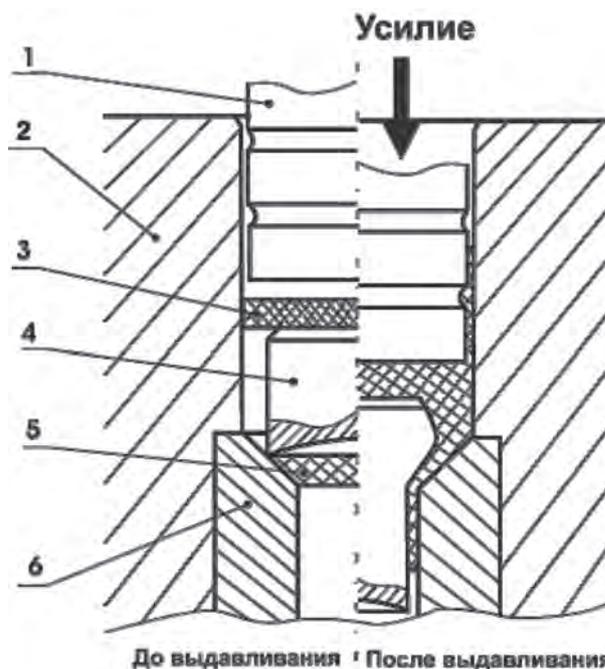


Рис. 4. Принципиальная схема процесса выдавливания чугунного прутка: 1 – пуансон; 2 – контейнер штампа; 3 – вкладыш для смазки из электродного графита; 4 – чугунная заготовка; 5 – конусная матрица; 6 – направляющая втулка

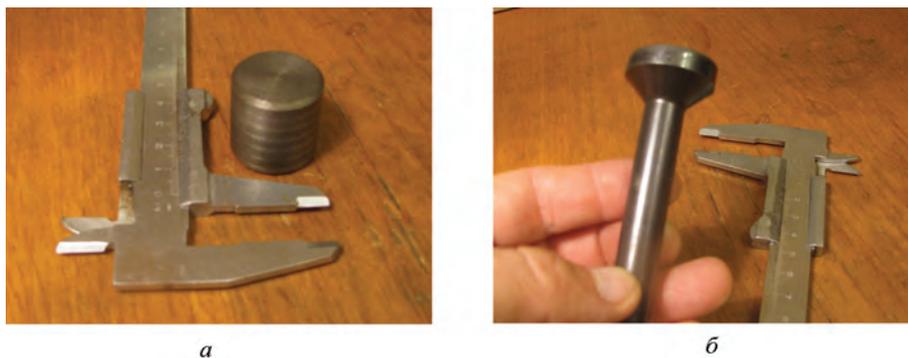


Рис. 5. Общий вид исходной заготовки из высокопрочного чугуна ВЧ50 (а) и полученного горячим выдавливанием деформированного прутка (б)

равномерность деформации по сечению. Выдавливание заготовки происходило через круглое отверстие конусной матрицы 5 и направляющую втулку б со скоростью около 0,8 м/с. Общий вид исходной заготовки и деформированного прутка представлен на рис. 5.

Приготовление шлифов и металлографические исследования проводили по известным методикам [24]. Морфологию поверхности графитных включений исследовали после предварительного электролитического вытравливания с растворением металлической матрицы и «обнажением» графитных включений. Использовали метод сканирующей (растровой) электронной микроскопии на установке SEM 515 производства фирмы «Phillips» (Нидерланды).

Результаты и их обсуждение

На первом этапе провели численный анализ процесса одноосного сжатия цилиндрических образцов с одним включением графита для различных степеней деформации (35, 60, 80 и 95%). Распределение эффективных напряжений по продольному сечению моделей образцов показано на рис. 6.

Из рисунка видно, что при низкой степени деформации (35%) в графитном включении наблюдается неравномерность эффективных напряжений, которые возрастают от центра к краю включения. При более высоких степенях эта неравномерность нивелируется. Отмечено наличие локального увеличения напряжений на границе «аустенитная матрица – графитное включение» при степени деформации 95%, которое сохраняется после прохождения активной фазы деформирования (на выходе из отверстия матрицы). Это может вызвать образование трещины на границе включения с металлической основой чугуна при достижении критического напряжения, которое зависит от соотношения модулей упругости включения и основы, а также поверхностной энергии на границе фаз. Вероятность появления трещин возрастает, если учитывать фактор последующего охлаждения и появления дополнительных термических напряжений из-за разности температур по сечению образца.

Для количественного анализа напряженно-деформированного состояния были построены графики зависимости напряжений от нормированного

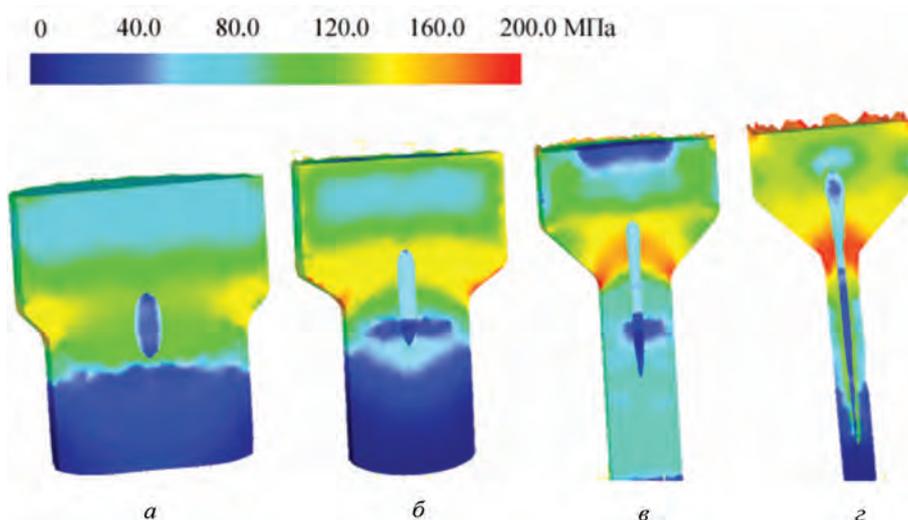


Рис. 6. Распределение эффективных напряжений по продольному сечению моделей образцов, выдавленных с различной степенью деформации: а – 35%; б – 60; в – 80; г – 95%

времени, где «нормированное время» – отношение прошедшего времени в данный момент процесса деформации к продолжительности всего цикла (рис. 7, *a–в*). На рис. 7, *б* показаны контрольные точки, выбранные для анализа напряжений в образцах «аустенитная матрица – включение графита».

Из рисунка видно, что напряжения в центре графитного включения плавно возрастают до прохождения активной фазы деформации. Отчетливо видна зависимость максимального значения напряжения от степени деформации. Аналогичные зависимости прослеживаются и в точках на краю

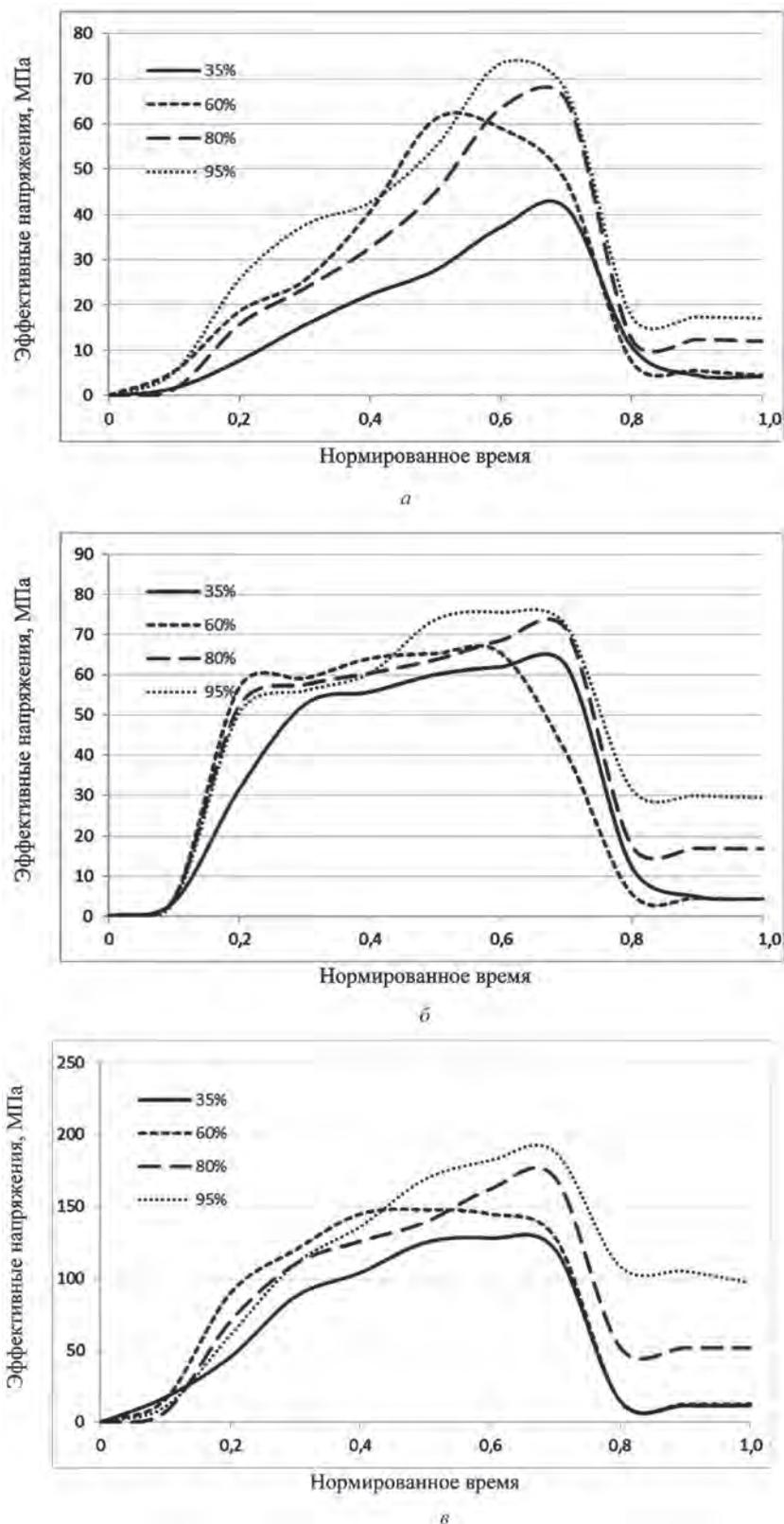


Рис. 7. Зависимости напряжений от времени: *a* – в точке КТ1; *б* – в точке КТ2; *в* – в точке КТ3

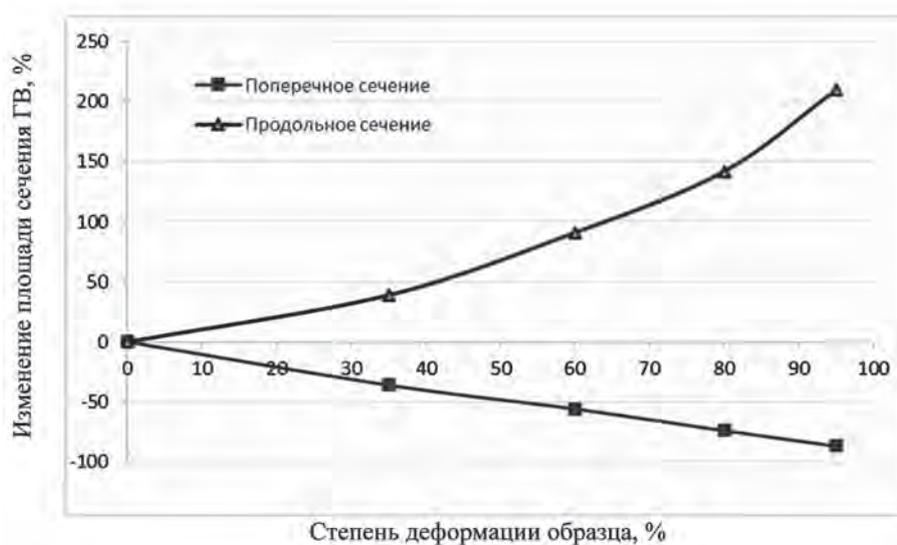


Рис. 8. Зависимость величины изменения площадей продольного и поперечного сечений одного графитного включения от степени деформации ячейки

включения и в аустенитной матрице, за исключением того, что возрастание напряжений происходит более резко. Вероятность возникновения трещин в графитном включении мала, так как известно, что при температуре 900 – 1000°C в графите увеличиваются прочностные свойства, особенно при сжатии [20]. Однако при 95% деформации возникают достаточно высокие напряжения в аустенитной матрице, которые сохраняются после прохождения активной фазы и в совокупности с остаточными напряжениями во включениях могут вызывать разрушение материала.

Один из важнейших показателей структуры чугуна – доля площади шлифа, занятая графитными включениями. Она является определяющей, например, при работе изделия в условиях трения. Поэтому чрезвычайно важно было понять, как изменяется доля графитных включений в продольном и поперечном сечении деформированного прутка по сравнению с первоначально изотропным в литом состоянии. Для этого были построены графики зависимости величины изменения площадей продольного и поперечного сечений графитного включения от степени деформации всей ячейки (рис. 8).

На рисунке видна практически линейная зависимость уменьшения площади поперечного сечения графитного включения по мере увеличения степени деформации. При этом графитное включение деформируется в меньшей степени по отношению к деформации всей ячейки. Изменение площади продольного сечения включения имеет экспоненциальную зависимость и при 95% деформации достигает значений 210%.

На втором этапе проводили сравнительный анализ напряжений между ячейками, содержащи-

ми одно и несколько включений графита. На рис. 9 показано распределение эффективных напряжений по продольному сечению аустенитной матрицы (графитные включения на рисунке показаны в аксонометрии на фоне распределения напряжений в металлической основе) при 60% степени деформации.

Использовали контрольные точки для количественного анализа напряжений, аналогичные первому этапу. На рис. 10 приведены зависимости эффективных напряжений от времени (нормированного) для ячеек с одним и несколькими графитными включениями при степени деформирования 60%.

Анализируя рис. 9, 10, можно сделать вывод, что при наличии в некотором объеме нескольких графитных включений происходит перераспределение напряжений в аустенитной матрице. При этом максимальные значения напряжений увеличиваются на 5–15%. В самих же включениях на-

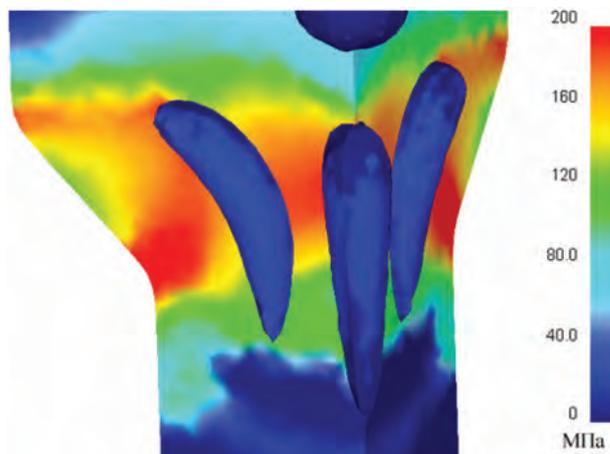


Рис. 9. Распределение эффективных напряжений в продольном сечении ячейки при степени деформации 60%

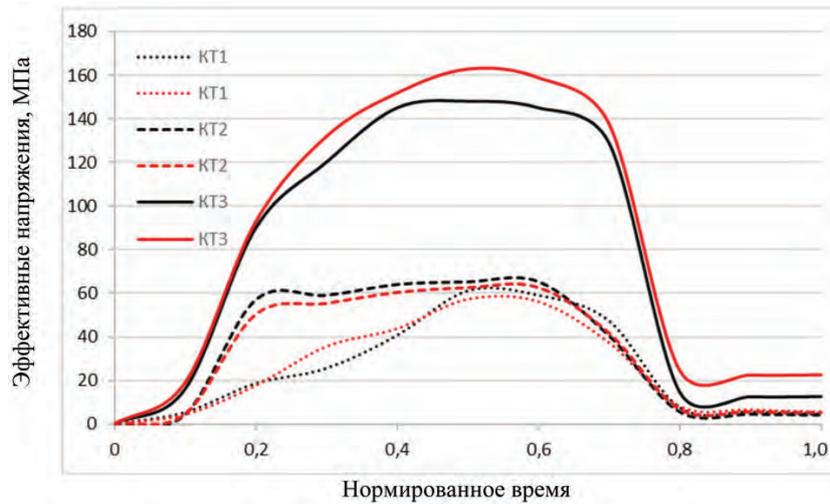


Рис. 10. Зависимость напряжений от времени для процесса одноосного сжатия цилиндрических образцов: черный цвет – с одним включением графита; красный цвет – с несколькими включениями графита

блюдается даже некоторое уменьшение напряжений как в центре включения, так и на периферии.

Полученные теоретические расчеты трансформации формы графитных включений были проверены экспериментально при выдавливании конкретных образцов из чугуна. На рис. 11 представлены микроструктуры, иллюстрирующие стадии изменения формы первоначального сферического графитного включения в высокопрочном чугуне по мере увеличения степени горячей деформации [2].

Из рисунка видно, что первоначальная сферическая форма включения по мере увеличения степени деформации трансформируется в эллипсообразную, веретенообразную и иглообразную.

Можно обратить внимание на рис. 11, б, на котором включение графита в своей центральной части имеет форму ромба. Такая форма графита и стадия деформации не отражаются при компьютерном моделировании. Можно лишь предположить, что существует несколько механизмов пластической деформации: на определенном этапе включение деформируется сдвигом (рис. 11, б), а в остальных случаях – пластическим течением.

Следует отметить, что микроструктуры (рис. 11) отражают лишь сечение графита в продольном направлении деформированного прутка и не дают ответа о пространственном расположении включения и его морфологии. Кроме того, из этих фотографий нельзя сделать однозначный вывод о том,

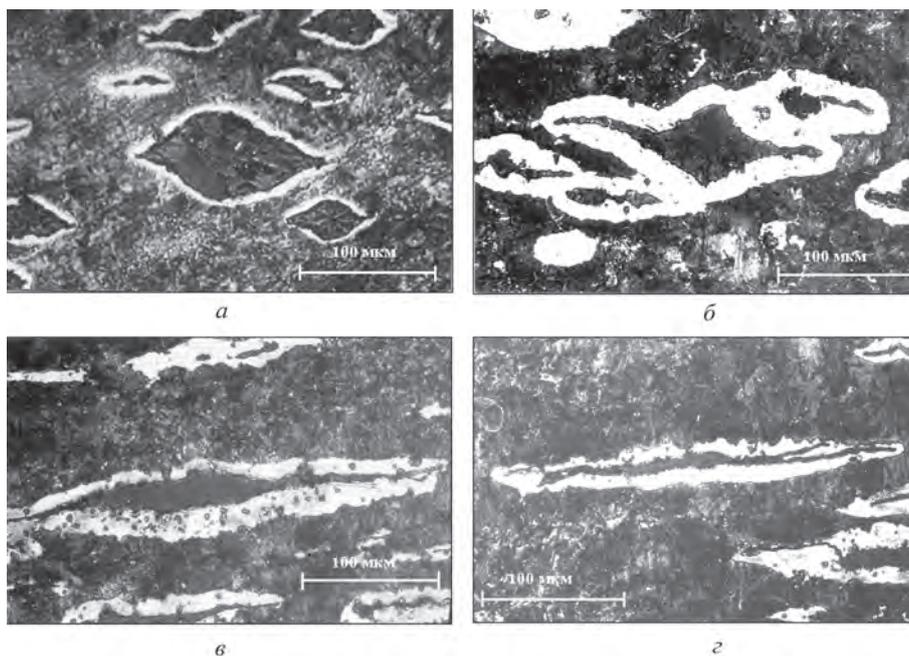


Рис. 11. Стадии изменения формы первоначального сферического графитного включения в высокопрочном чугуне по мере увеличения степени горячей деформации. Продольное сечение. Травлено нитралем. $\times 500$

что графитные включения после деформации испытывают пластическую деформацию и при этом не разрушаются. Для выявления объемной формы включений проводили предварительное электролитическое вытравливание поверхности продольного шлифа с растворением металлической матрицы и «обнажением» графитных включений. Такие более информативные фотографии микроструктур, на которых показано видоизменение формы графитных включений высокопрочного чугуна по мере увеличения степени деформации при горячем выдавливании, представлены на рис. 12.

Из рис. 12 видно, что исходная слоистая структура графита (рис. 12, *а*) сохраняется и после деформации (рис. 12, *б*). Морфология поверхности в обоих случаях представляет собой перекрывающиеся чешуйки, напоминающие «капустные листья». Что касается пластической деформации графита, то наиболее нагляден рис. 12, *в*, который убедительно демонстрирует неповрежденное графитное включение, подвергшееся пластической деформации со степенью 80%. Тем самым, опровергается бытовавшее до сих пор у многих представление о том, что графит в чугуне при деформации выкрашивается и рассыпается в порошок.

Что касается свойств деформированного чугуна, то, очевидно, что они будут сильно зависеть от ориен-

тации и расположения включений. В данном простом примере прямого продольного выдавливания с большой долей вероятности можно предположить увеличение свойств в осевом направлении и ухудшения в радиальном. При штамповке реальных изделий из чугуна, имеющих гораздо более сложную форму, такие прогнозы сделать затруднительно. В дальнейшем будет сделана попытка промоделировать форму графита и напряженно-деформированное состояние с конкретными изделиями типа втулок.

Выводы

1. Показано, что наибольшие напряжения при горячем выдавливании высокопрочного чугуна, достигающие 200 МПа, наблюдаются при выдавливании в зоне отверстия деформирующего инструмента – матрицы. Напряжения в аустенитной матрице при высоких степенях деформации сохраняются после прохождения активной фазы и в совокупности с остаточными напряжениями во включениях могут вызвать разрушение материала.

2. Компьютерное моделирование показало, что наличие в некотором объеме нескольких графитных включений приводит к перераспределению напряжений как в металлической матрице, так и в самих включениях. Поэтому в дальнейших расчетах необходимо использовать ячейку, содержащую минимум пять включений графита.

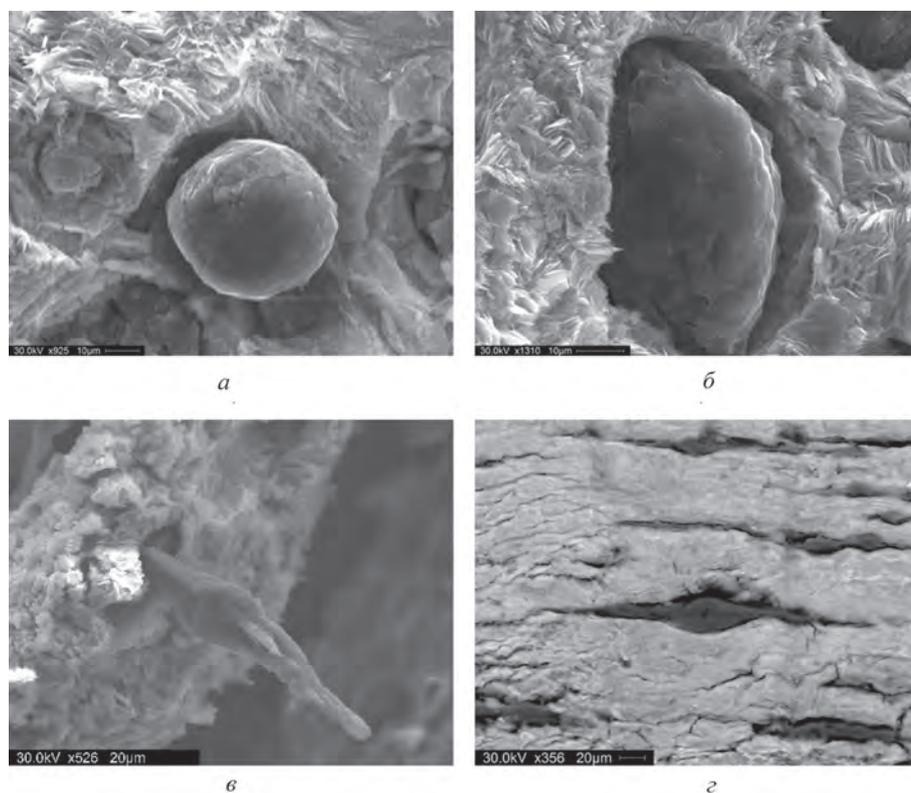


Рис. 12. Стадии изменения формы сферического графитного включения по мере увеличения степени деформации в процессе горячего выдавливания: *а* – исходное (литое) состояние. $\times 925$; *б* – деформация 35%. $\times 1310$; *в* – деформация 35%. $\times 526$; *г* – деформация 35%. $\times 356$

3. Доказано, что графитные включения в чугуне при горячем выдавливании деформируются пластически, а не разрушаются, превращаясь в порошок. Впервые представлены фотографии деформированного графитного включения, позволяющие наглядно судить о его аксонометрии и морфологии поверхности.

4. Проведенное в данной работе моделирование процесса горячего выдавливания чугуна в основном подтверждается экспериментальными исследованиями. Тем не менее, модель не отражает всего многообразия форм графита, например, появление на определенном этапе своеобразной «ромбической» формы графита в центре включения или так называемых «усов» – утончений на его концах (при самых больших степенях деформации).

5. Можно предположить, что по мере увеличения степени обжаривания вступают в действие различные механизмы пластической деформации: на определенном этапе (в достаточно узком интервале деформаций около 60 – 70%) включение деформируется сдвигом, а в остальных случаях пластическим течением.

6. Приведенные количественные данные о формоизменении графитных частиц при деформировании высокопрочного чугуна могут быть использованы при выборе технологических параметров обработки давлением чугуна при получении конкретных изделий, прогнозировании структуры, а, следовательно, и физико-механических характеристик деформированного чугуна.

Литература

1. Callister, William D., Rethwisch, David G. *Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach*, 4th Edition, John Wiley: New York, 2012.
2. Горячая пластическая деформация чугуна: структура, свойства, технологические основы / А. И. Покровский. Минск: Беларуская навука, 2010.
3. Структурообразование чугуна при горячей пластической деформации (научные и технологические основы получения изделий из чугуна с использованием горячего выдавливания и штамповки) / А. И. Покровский. Изд-во «LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co». Saarbrücken, Germany, 2012.
4. Hans Berns, Werner Theisen. *Eisenwerkstoffe. Stahl und Gusseisen*. Bochum: Springer, 2008.
5. Бунин К. П., Малиночка Я. Н., Гаран Ю. Н. *Основы металлографии чугуна*. М.: Металлургия, 1969.
6. *Graphite and its Cristal Copounds*. Ubbelohde A. R., Lewis F. A. Oxford. At the Claredon Press, 1960.
7. Чугун: справ. изд. / Под ред. А. Д. Шермана, А. А. Жукова. М.: Металлургия, 1991.
8. Пластическое течение включений цементита и графита при обработке давлением чугуна / Покровский А. И. // *Литье и металлургия*. 2013. № 1 (69). С. 88–95.
9. Влияние горячей пластической деформации на изменения микроструктуры чугуна с шаровидным графитом / А. С. Чаус, Я. Сойка, А. И. Покровский // *Физика металлов и металловедение*. 2013. Т. 114. № 1. С. 94–104.
10. Влияние формы графитовых включений на акустические характеристики изделий из литого и деформированного чугуна / А. И. Покровский, А. С. Чаус, Э. Б. Куновский // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2011. № 7 (673). С. 3–10.
11. Исследование пластичности и технологической деформируемости чугуна / А. И. Покровский, А. П. Ласковнев. Витебск, Изд. ВГТУ. 2013. С. 566–586.
12. 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. С. 55–61.
13. Баранов Д. А., Неснов Д. В. Компьютерное моделирование формозміни графіту при деформації високоміцного чавуну // *Металознавство та обробка металів*. 2002. № 4. С. 13–16.
14. Исследование напряженно-деформированного состояния высокопрочного чугуна после его горячего выдавливания / А. И. Покровский, И. Н. Хроль, В. Л. Ковтун, Т. В. Рябченко // *Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин: Сб. науч. тр. Полоцкого гос. ун-та. В 3-х т. Т. 1*. Новополоцк: Изд-во ПГУ, 2009. С. 121–124.
15. Micromechanical modeling of the elasto-plastic behavior of heterogeneous nodular cast iron / Luca Collini // *Dottorato di Ricerca in Ingegneria Industriale XVII Ciclo*, 2004.
16. Теоретический анализ напряженно-деформированного состояния в области включения второй фазы при обработке давлением двухфазных материалов / А. А. Миленин // *Металлы*. 1995. № 2. С. 108–114.
17. Fields of strains around the inclusion of second phase in a uniform matrix undergoing plastic deformation / M. Pietrzyk, J. Kusiak, H. Kusiak & F. Grosman // *Steel Research*. 1991. Vol. 62. P. 507–511.
18. Stress and strain fields around inclusions in a plastically deforming matrix / R. D. Thomson and J. W. Hancock // *Proc. ICM4*, Stockholm, Sweden/ 1983. Vol. II. P. 733.
19. Rolling consolidation of metal matrix composites / K. H. Im and C. K. H. Dharan // *Int. J. Mach. Manufact.* 1997. Vol. 37. P. 1281–1302.
20. Искусственный графит / В. С. Островский, Ю. С. Виргильев и др. М.: Металлургия, 1986.
21. *Graphit design handbook* / F. H. Ho // San-Diego, California, 1988. 122p.
22. *Mechanical properties of graphite* // Entegris INC. 2013. 38p.
23. Горячее гидродинамическое выдавливание режущего инструмента / В. П. Северденко, В. С. Мурас, Э. В. Суходрев. Наука и техника, 1974.
24. Баранова Л. В. и др. Металлографическое травление металлов и сплавов: Справ. М.: Металлургия, 1986.