



УДК 669.017:539.37

Поступила 19.10.2015

## СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗЛОМОВ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА В ЛИТОМ И ДЕФОРМИРОВАННОМ СОСТОЯНИИ

### COMPARATIVE RESEARCHES OF FRACTURES OF HIGH-STRENGTH CAST IRON IN THE AS-CAST AND DEFORMED STATE

*А. И. ПОКРОВСКИЙ, Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь,  
И. Н. ХРОЛЬ, Министерство промышленности Республики Беларусь, г. Минск, Беларусь*

*A. I. POKROVSKY, Physical and Technical Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,  
I. N. KHROL, Ministry of the Industry of Republic of Belarus, Minsk, Belarus*

Представлены результаты сравнительных исследований фрактограмм высокопрочного чугуна в литом состоянии и после горячей пластической деформации. Показан характер изменения формы и морфологии включений графита, а также структуры металлической матрицы по мере увеличения степени деформации от 0 (литое состояние) до 80%. При помощи метода электрохимического вытравливания с растворением металлической матрицы и постепенным обнажением поверхности включений графита впервые наглядно продемонстрирована их аксонометрия. Доказано, что при горячей деформации чугуна происходит пластическое течение включений графита. Показано, что во включении графита существуют различные зоны деформации, распределенные неравномерно: в большей мере деформируются краевые зоны, а в центральной части может сохраняться присущая исходному сферическому включению радиальная структура. Факт того, что большая часть включений графита в изломе деформированного высокопрочного чугуна оказалась неповрежденной (обнаружено весьма малое количество разрушенных включений) может изменить сложившееся мнение о роли графита как о месте зарождения трещины. Высказано предположение, что трещина зарождается в металлической матрице (вероятно, на границе между перлитом и ферритом) и распространяется от включения к включению графита, огибая, но не повреждая их.

*The results of comparative studies of fracture surfaces of high-strength cast iron in the as-cast state and after hot direct extrusion through an aperture of a conical die are presented.*

*The shape change of graphite inclusions and components of the metal matrix is examined with increasing the reduction ratio from 0 (as-cast state) to 80%.*

*For the first time, using the electrochemical etching of the metal matrix of the cast iron, it is demonstrated experimentally that at plastic deformation the ductile flow of graphite inclusions occurs without fracturing of the latter. The surface morphology of a deformed graphite inclusion is revealed. It is shown that inside the inclusion the strain is distributed non-uniformly: the peripheral zones are deformed to a larger extent while the central part may retain its original radial structure.*

*The fact that the most part of graphite inclusions on the fracture surface of the deformed cast iron appeared undamaged (very small amount of fractured inclusions was observed) testifies against the common opinion that graphite acts as a crack nucleation site. A hypothesis is put forward that the crack nucleates in the metal matrix, presumably at the pearlite/ferrite interface, and propagates from one graphite inclusion to another rounding but not damaging the latter.*

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

**Keywords.** Hot plastic deformation, high-strength cast iron, structure, metal matrix, graphite inclusions.

#### Введение

Одним из широко распространенных методов исследования структуры металла является металлографический, основанный на изучении микроструктуры при химическом травлении плоской полированной поверхности шлифа. Применительно к исследованию чугунов ему посвящено множество публикаций, начиная от основополагающей монографии [1], ряда известных справочников [2, 3], а также действующего ГОСТ [4].

Следует отметить, что одна из специфических особенностей микроструктуры чугунов – ярко выраженная гетерогенность, обусловленная наличием в металлической матрице включений графита различной степени разветвленности, а также ледебуритной эвтектики с цементитным скелетом сложной конструкции и аустенитными зернами. Поэтому металлографические исследования произвольных сечений на плоских образцах не всегда достаточно информативны, не позволяют объективно оценить пространственное расположение включений в структуре чугуна, провести их стереологический анализ, оценить их объемный вид. Для уточнения результатов металлографического анализа иногда используют сложный и непроизводительный метод многократной переполровки шлифа и исследование одного и того же участка структуры под микроскопом. С его помощью удается доказать, например, что кажущиеся изолированными многие мелкие включения графита являются на самом деле сечением одной разветвленной графитной колонии.

Между тем, новые процессы обработки чугунов продолжают развиваться, что приводит к дальнейшему усложнению микроструктур. Например, в последние десятилетия разработаны технологические процессы обработки чугунов давлением при высоких температурах. Исследованию влияния воздействия горячей пластической деформации на чугуны посвящен ряд работ, например, в [5] описаны технологические аспекты процесса, в [6, 7] – особенности структурообразования деформированного чугуна. Показано, что с помощью обработки давлением можно не только придать изделию из чугуна точную форму и устранить ряд литейных дефектов, но и получать такую микроструктуру, которая обеспечивает существенное улучшение механических, триботехнических и эксплуатационных характеристик по сравнению с литым состоянием, например, возможно существенное снижение уровня шума при работе деталей [8]. Следует отметить, что при изучении микроструктуры чугунов, подвергнутых деформированию (когда структура претерпевает очень сильные изменения, а включения дробятся, вытягиваются, переплетаются), недостатки и малоинформативность классической металлографии проявляются еще в большей мере.

Определенную помощь в прогнозировании структурообразования деформированного чугуна могут оказать методы компьютерного моделирования. Например, моделирование напряженно-деформированного состояния высокопрочного чугуна при горячем выдавливании позволяет спрогнозировать форму и расположение включений и высказать предположение, что включения цементита и графита испытывают пластическое течение [9, 10].

Наиболее же информативным методом исследования структуры является сканирующая электронная микроскопия. Обладая в отличие от оптической металлографии большей разрешающей способностью и глубиной резкости, она позволяет проследить в объемном виде видоизменение формы и морфологии включений, металлической матрицы, характера разрушения поверхности. Что касается литого высокопрочного чугуна, то описания его фрактограмм известны [11–13]. Исследованию же изломов деформированного чугуна уделено недостаточное внимание.

Цель работы – исследование микроструктур и фрактограмм высокопрочного чугуна после горячей пластической деформации и сравнение их с исходными (литыми) образцами. Были поставлены следующие задачи исследования:

1. Провести сравнение характера излома металлической матрицы в литом и деформированном чугуне.
2. Получить максимально наглядные изображения формы и морфологии включений графита после деформации, выяснить, как они видоизменяются по мере увеличения степени деформации.
3. Определить место возникновения трещины при разрушении литого и деформированного чугуна, как она распространяется, какие структурные составляющие отвечают за ее распространение, а какие ее тормозят.
4. Однозначно ответить на вопрос: что происходит с включением графита при деформации. Оно дробится и разрушается на фрагменты и осколки, превращается в порошкообразную субстанцию, «размазывается» по микропорам, или пластически деформируется? Предварительно отметим, что до сегодняшнего дня существует мнение, что хрупкие графитные включения при деформации должны разрушаться так же, как разрушается под нагрузкой, например, графит в грифеле карандаша, превращаясь в раздробленную порошкообразную субстанцию.

#### **Материал и методика исследования**

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

Плавку чугуна проводили в индукционной высокочастотной печи марки ИСТ-016 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 ФСМg7K03, для вторичного модифицирования использовали ферросилиций марки ФС75. Разливку осуществляли в вертикальные песчано-глинистые формы. Отливки представляли собой прутки диаметром 35 мм и длиной 150 мм.

Для деформирования использовали схему неравномерного всестороннего сжатия, которую реализовали в технологическом процессе прямого горячего выдавливания через круглое отверстие конической матрицы, получая на выходе деформированные прутки. Выдавливание проводили на серийном кривошипно-шатунном прессе марки K2130 усилием 100 т в специальной подогреваемой до 400 °С штамповой оснастке. Скорость движения пуансона составляла около 1 м/с. Относительную степень деформации (отношение разности площадей начального и конечного сечения заготовки к исходной площади) варьировали от 20 до 80% путем увеличения диаметра исходной заготовки при том условии, что получаемые деформированные прутки имели одинаковый диаметр – 12,5 мм. Условия всестороннего неравномерного сжатия обеспечивались использованием противодавления: на выходе прутка из штамповой оснастки устанавливали пневмоцилиндр со сжатым воздухом, давление которого подбиралось экспериментально для каждой степени деформации так, чтобы получать качественное изделие без трещин.

Применяли индукционный нагрев заготовок под деформацию, общее время которого не превышало 50–90 с. Температура деформации находилась в интервале 900–1000 °С, контролировали ее оптическим пирометром, охлаждение полученных прутков проводили как на спокойном воздухе, так и с обдувом воздухом.

Приготовление шлифов и металлографические исследования выполняли по известным методикам [3]. В качестве химического травителя использовали состав так называемого «ниталья» – 3%-ный раствор азотной кислоты в этиловом спирте.

Фрактограммы исследовали на сканирующем электронном микроскопе SEM 515 производства фирмы «Phillips». Сравнивали поверхности изломов литых и деформированных образцов высокопрочного чугуна после стандартных испытаний на растяжение и ударную вязкость. Как известно, при деформации выдавливанием структура приобретает текстурированность вдоль направления вытяжки. Поэтому исследовали образцы, вырезанные как вдоль, так и поперек направления выдавливания. Схема вырезки образцов из деформированного чугунного прутка показана на рис. 1 (чтобы наглядно показать, как в образце расположены вытянутые включения графита, они условно изображены в виде эллипсов темного цвета).

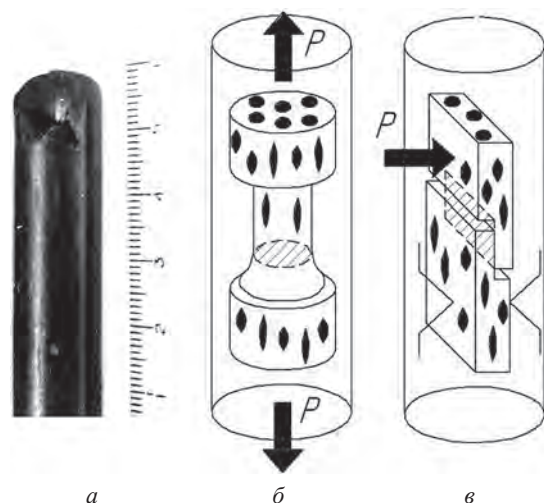


Рис. 1. Внешний вид чугунного прутка, полученного горячим выдавливанием (а) и схемы вырезки из него образцов для испытания на растяжение – для исследования изломов в поперечном сечении (б) и образцов для испытания на ударную вязкость – для исследования изломов в продольном сечении (в). На каждом из образцов схематично показаны расположение вытянутых графитных включений (в виде темных эллипсоидов) и плоскость разрушения (заштрихована)

распределены вытянутые включения графита, они условно изображены в виде эллипсов темного цвета).

Терминологию в обозначении изломов образцов поясним исходя из рис. 1. «Поперечным сечением» называли сечение образца, располагающееся в плоскости, перпендикулярной направлению вытяжки (на рис. 1, б сечение заштриховано). «Продольным» называли сечение, располагающееся в плоскости, параллельной направлению вытяжки (на рис. 1, в сечение заштриховано).

Особенности образцов для испытаний на ударную вязкость. Из-за того, что деформированные прутки имели небольшой диаметр (12,5 мм), «вписать» в него стандартный образец на ударную вязкость можно было только таким образом, что плоскость излома располагалась бы тоже поперек направления вытяжки. Чтобы получить расположение излома вдоль направления вытяжки, использовали специальный образец с двумя надрезами (рис. 1, в). Нижняя сторона образца жестко фиксировалась в зажиме копра (на рис. 1, а зажим схематично обозначен в виде двух треугольников), а оба надреза оставались при этом свободными. При ударе молота о свободный край зафиксированного образца (место удара на рис. 1, в указано стрелкой с буквой «Р») формировалась поверхность излома, совпадающая с направлением течения металла.

Исследовали два типа поверхностей излома:

1. Излом после разрушения без какой-либо дополнительной обработки поверхности в состоянии «как есть». Следует уточнить, что предварительные исследования выявили определенные недостатки этого метода, связанные с тем, что в ходе разрушения образца часть включений графита из места излома теряется (выпадает, выкрашивается, обламывается). На поверхности сохраняются лишь следы нахождения включений в виде лунок и кратеров. В случае исследования деформированных образцов прямое наблюдение изломов оказалось еще менее информативным. Дело в том, что под воздействием обработки давлением шаровидные включения графита значительно вытягиваются, приобретая эллипсообразную или волокнообразную форму, их поверхность можно рассмотреть лишь частично, большая ее часть скрыта в толще металлической матрицы, что не позволяет объективно оценить морфологию.

2. Поверхности изломов после дополнительного травления. Поскольку особый интерес для нас представляли внешний вид и морфология включений графита после деформации, то поверхности исследовали также после дополнительного электрохимического травления. Основная часть методики электрохимического травления известна [3]. Но в данной работе для более эффективного выявления включений дополнительно использовали специально для этого разработанные оригинальные устройства [14, 15]. В качестве электролита применяли раствор, состоящий из смеси 0,5%-ной соляной и 3%-ной лимонной кислот в воде. Процесс травления происходил следующим образом: при приложении к исследуемому образцу положительного заряда металлическая матрица чугуна растворялась, а графитные включения постепенно «обнажались», причем в неповрежденном виде.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### Микроструктурный анализ

На рис. 2 приведены микроструктуры высокопрочного чугуна в литом (рис. 2, *а*) и деформированном состоянии (рис. 2, *б*).

Микроструктура в обоих случаях состоит из перлитно-ферритной металлической матрицы и включений графита. В литом чугуне графит имеет форму, близкую к сферической (рис. 2, *а*), а после деформации превращается в вытянутую волокнообразную (рис. 2, *б*). В результате деформации, проводимой в аустенитном состоянии, а также последующего ускоренного охлаждения на воздухе количество перлита в структуре возрастает с 60 до 90% (рис. 2, *б*).

Приведенные микроструктуры подтверждают высказанный выше тезис о недостаточной информативности классической металлографии, так как морфологию и целостность графитных включений, подвергшихся деформации, трудно объективно оценить.

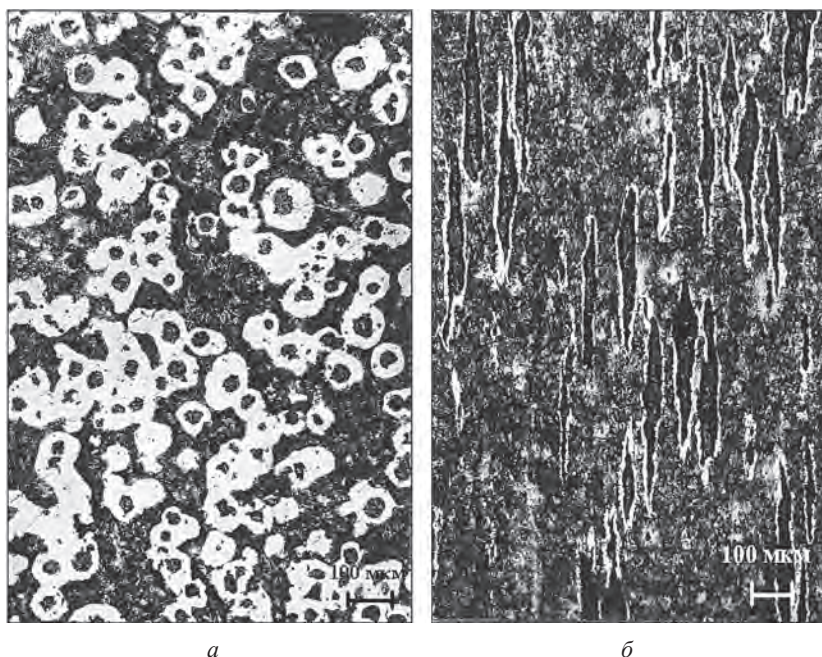


Рис. 2. Микроструктура высокопрочного чугуна в литом состоянии (*а*) и после горячего выдавливания со степенью деформации 80%, продольное сечение (*б*). Травлено ниталем.  $\times 100$

### Исследование фрактограмм чугуна в литом состоянии

Анализ изломов чугуна в литом состоянии (рис. 3) показывает, что поверхность неоднородна и носит рельефный характер. Можно отметить наличие весьма характерных, назовем их «листьеобразными», участков, напоминающих древесный лист с темными плоскими участками и веерообразно расходящимися по ним светлыми прожилками (рис. 3, *a*). С большой вероятностью можно утверждать, что контуры так называемых «листьев» являются границами бывшего аустенитного зерна, а их внутреннее содержание представляет собой пластинчатый перлит. Часто встречающиеся на поверхности «листа» достаточно большие плоские участки, имеющие однородную фактуру, представляющие своего рода фасетки или террасы (рис. 3, *a*), вероятнее всего, участки хрупкого разрушения, распространяющегося по пластинам цементита перлита. Светлые линии, напоминающие «прожилки в листе», – места вязкого разрушения ферритной составляющей перлита.

В целом излом металлической матрицы литого чугуна можно охарактеризовать как смешанный. Под этим мы подразумеваем то, что он включает в себя как зоны хрупкого межзеренного излома с преимущественным разрушением по границам зерен (занимающие большую долю излома), так и с элементами пластической деформации ферритной составляющей (значительно меньшая доля в изломе).

Помимо металлической матрицы, состоящей из пластинчатого перлита, на поверхности излома присутствуют шаровидные включения графита темного цвета (рис. 3, *a, б*), выступающие над поверхностью излома на 1/3–1/2 своего диаметра. Отметим, что после разрушения включение графита либо сохраняется в металлической матрице, либо вырывается из нее, но при этом видимые следы разрушения самих включений графита отсутствуют. При увеличении 2000 можно наблюдать (рис. 3, *б*), что включение находится в окаймляющей его вязкой зоне, характеризующейся повышенной пластичностью, о чем свидетельствуют приподнятые и вытянутые края воронки. Очевидно, что это ферритная оторочка вокруг включения, носящая, согласно терминологии специалистов по чугунам, специфическое название «бычий глаз».

Судя по характеру излома, можно предположить, что развитие трещины могут тормозить два элемента структуры: участки ферритной составляющей в перлите и ферритные оторочки графита, так как на их пластическую деформацию затрачивается определенная часть энергии. В связи с этим ферритная оторочка вокруг включения графита является зоной, где трещина распространяется по вязкому типу, а скорость ее распространения замедляется.

Что касается места зарождения трещины, то можно предположить, что это перлит или межфазная граница между включением графита и металлической матрицей в той области, где графит расположен непосредственно в перлите, а не окаймлен ферритной оторочкой. Начавшись в одном из таких мест, трещина распространяется, вероятно, по границам бывших аустенитных зерен с формированием больших участков межкристаллитного излома протяженностью до 300–400 мкм. Отметим еще раз удивительную особенность излома, что включения графита при этом огибаются трещиной, но не повреждаются.

Поверхности излома литого чугуна после дополнительного электрохимического травления приведены на рис. 4. Из рисунка видно, что включение графита сохраняется неповрежденным и удерживается у своего основания небольшими остатками металлической матрицы (рис. 4, *a*), сферическая форма его хорошо просматривается. Морфология поверхности графита складывается из большого числа чешуек,

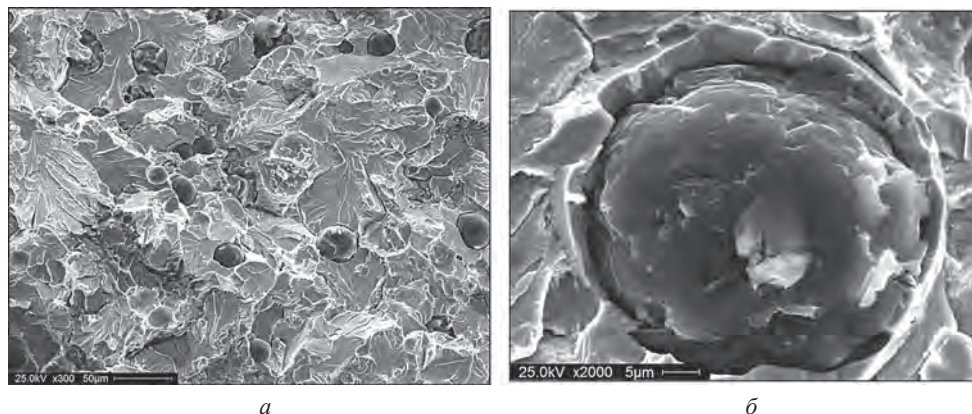


Рис. 3. Излом литого высокопрочного чугуна (в исходном недеформированном состоянии). Место исследования – «шейка» разрушенного образца после испытаний на растяжение: *a* –  $\times 300$ ; *б* –  $\times 2000$

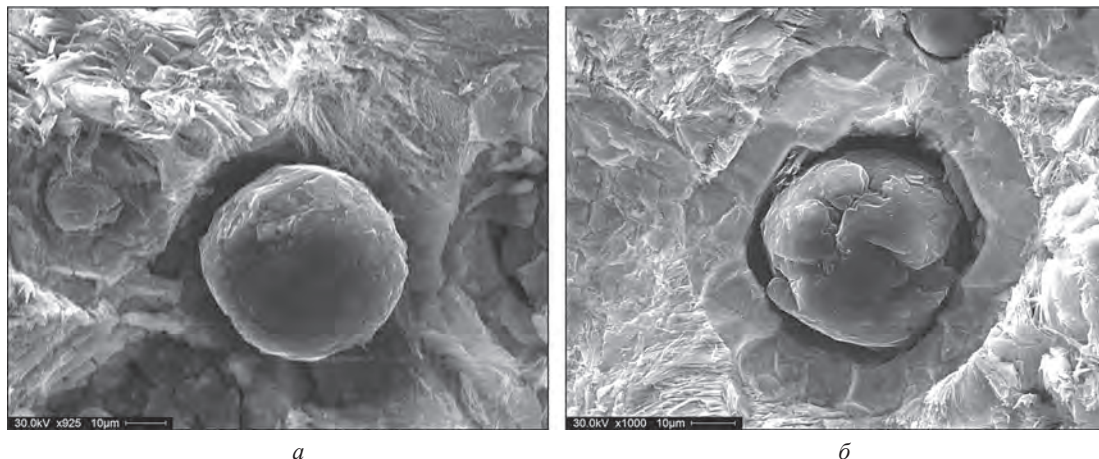


Рис. 4. Поверхность разрушения литого высокопрочного чугуна (в исходном состоянии, без деформации). Электрохимическое травление: *а* –  $\times 925$ ; *б* –  $\times 1000$

по форме, близких к сегментам полусфер разной величины, перекрывающих друг друга и напоминающих строение кочана капусты (рис. 4, б).

После электрохимического вытравливания (рис. 4) можно проанализировать и образовавшуюся характерную морфологию металлической матрицы – перлита. Она состоит из множества тонких пластин и игл. Такой характер поверхности объясняется тем, что в пластинчатом перлите ферритная составляющая растворяется гораздо интенсивнее, чем цементитный каркас. В случае, когда скол происходит поперек перлитной колонии, заметны своего рода террасы, состоящие из параллельно расположенных пластинок цементита (на рис. 4, *а* справа сверху).

Ферритная оторочка вокруг включения графита после электролитического травления (рис. 4, б) приобретает характерную рельефную поверхность. Менее сильно вытравливается сердцевина ферритного зерна, а границы зерен – больше и по ним образуются канавки травления. Это подтверждается при сопоставлении фрактограммы (рис. 4, б) с микрошлифом аналогичного участка (рис. 5); в обоих случаях заметны границы зерен, радиально отходящие от края графитного включения.

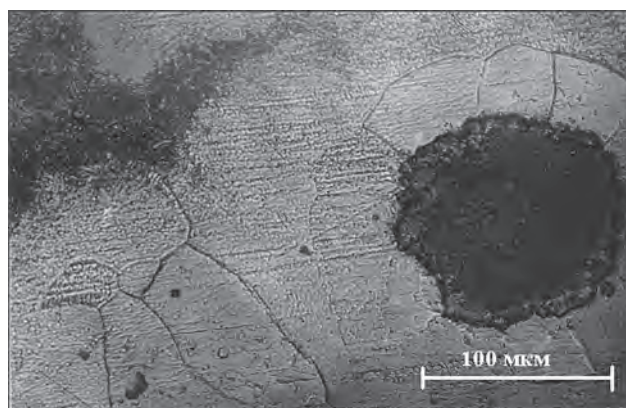


Рис. 5. Микроструктура высокопрочного чугуна в литом состоянии (без деформации). Травлено ниталем.  $\times 100$

### Исследование фрактограмм чугуна, деформированного со степенью 20%

При рассмотрении изломов деформированного чугуна следует учитывать, что на их микроструктуру оказывают влияние несколько факторов: наклеп и последующая рекристаллизация, а также распад аустенита при охлаждении поковки на воздухе. Следовательно, в структуре можно ожидать как изменения размеров аустенитных зерен, так и изменения соотношения в структуре количества перлита и феррита.

На рис. 6 приведены фрактограммы чугуна, деформированного со степенью 20% в поперечном и продольном сечениях.

Из рисунка видно, что включения графита либо сохраняются в металлической матрице, либо вырываются из нее (в верхней части рис 6, б), но не повреждаются. Следы пластической деформации выражаются в образовании кратеров и ямок различной величины, а также в формировании складок по краям кратеров.

При степени деформации 20% морфология поверхности графита на поперечных образцах отличается от литых образцов несущественно (сравним рис. 6, *а*, *в* с рис. 4, *а*). Некоторым отличием, пожалуй, является лишь то, что в литом чугуне чешуйки выглядят более гладкими, а у деформированного – на поверхности чешуек имеются большое число рисок и полосок, похожих на террасы.

Рассмотрение продольного сечения изломов (рис. 6, б, г) показывает, что включение графита при степени деформации 20% существенно не изменяет своей формы, сохраняясь шаровидным, зато за-

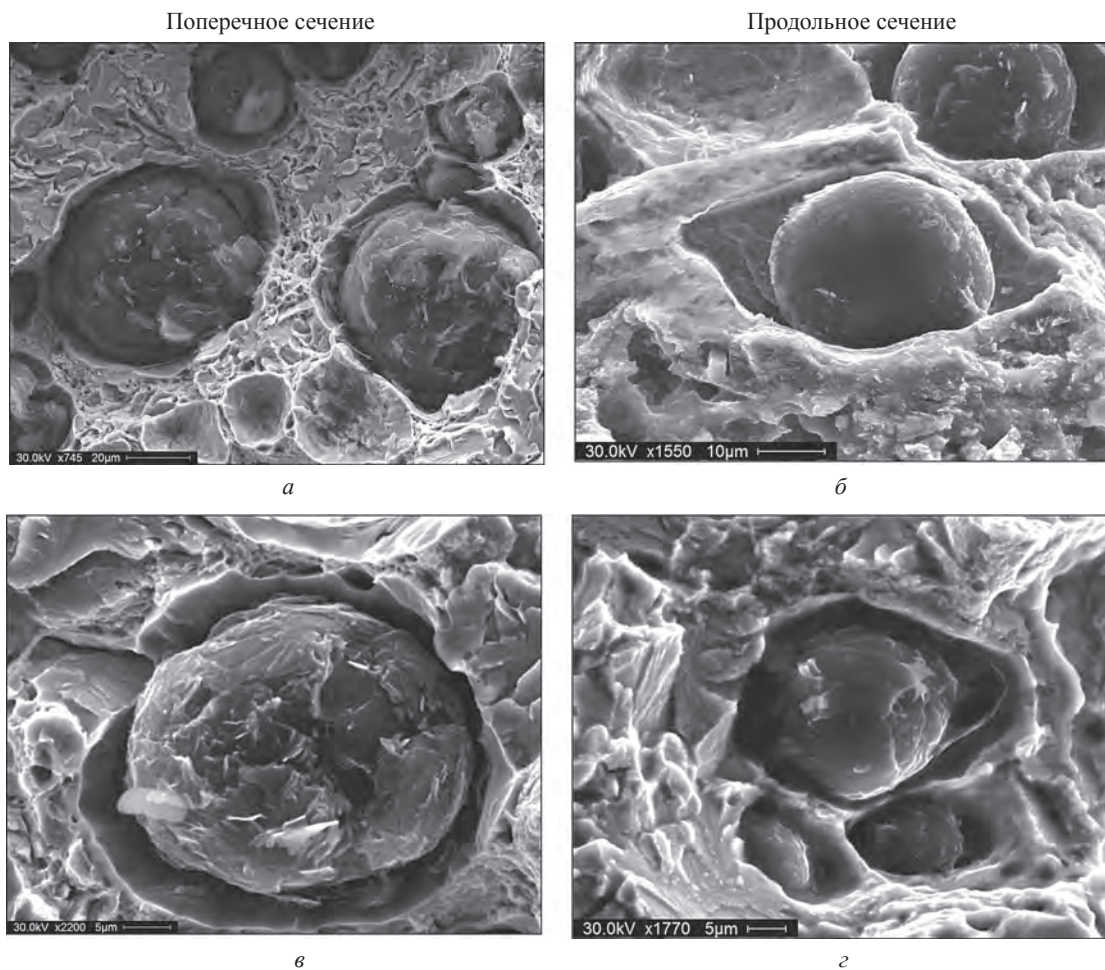


Рис. 6. Расположение включений графита на поверхности излома высокопрочного деформированного чугуна. Степень деформации 20%. *а, в* – поперечное сечение; *б, г* – продольное сечение. *а* –  $\times 745$ ; *б* –  $\times 1550$ ; *в* –  $\times 2200$ ; *г* –  $\times 1770$

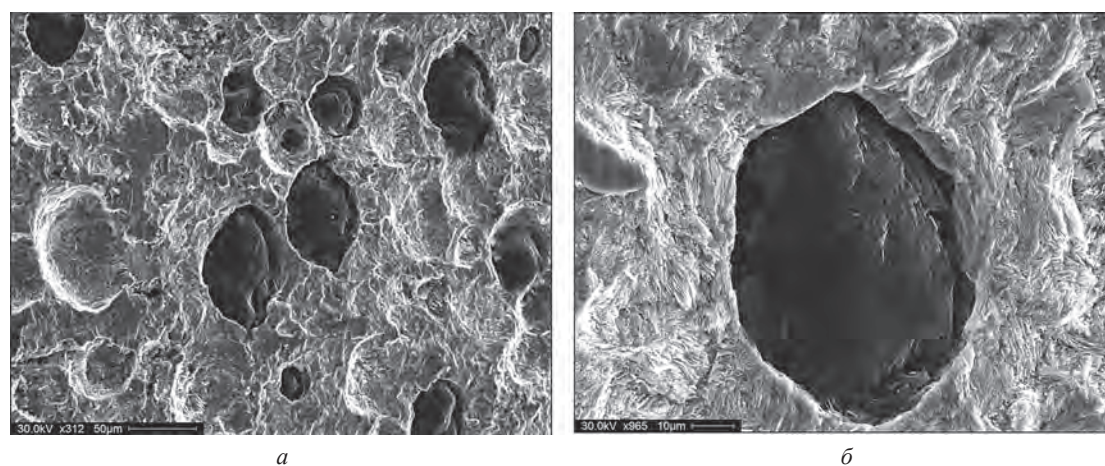


Рис. 7. Поверхность излома высокопрочного деформированного чугуна. Степень деформации 20%. Ускоренное охлаждение за счет обдува воздухом. Продольное сечение. Электрохимическое травление: *а* –  $\times 312$ ; *б* –  $\times 965$

метно деформируется окружающая его ферритная оторочка, приобретая характерную форму эллипса (рис. 6, б, г). Можно даже предположить образование пустот в вершинах ферритного «эллипса» в процессе деформации феррита.

Характер разрушения металлической матрицы у деформированных со степенью 20% образцов является смешанным хрупковязким и близок к литым образцам, однако доля вязкой составляющей становится несколько выше. Можно отметить следующую закономерность: чем больше доля перлита в структуре, тем больше доля хрупкой составляющей. Анализируя рис. 7, где представлен излом деформированного чугуна с той же степенью деформации (20%), но с ускоренным охлаждением за счет обдува возду-

хом, можно заключить, что количество перлита и соответственно доля хрупкой составляющей в изломе значительно увеличиваются. Вязкой составляющей является ферритная оболочка вокруг графита, образующая на поверхности сеть крупных ямок и кратеров, а основная часть структуры представляет собой фасетки скола, проходящие по границам бывших аустенитных зерен.

На рис. 7, б показано графитное включение, располагающееся в металлической матрице на 90% состоящей из пластинчатого перлита. Подавляющую часть металлической основы занимают тонкие параллельно расположенные пластинки цементита перлита, сохранившиеся не вытравленными, а само включение находится в обрамлении тончайшей пластичной ферритной оторочки (ее пластическая деформация хорошо заметна в верхней правой части кратера в виде своеобразного «обрыва», имеющего однородную светлую фактуру (рис. 7, б)).

### Исследование фрактограмм чугуна, деформированного со степенью 60%

На рис. 8 представлены фрактограммы чугуна, деформированного со степенью 60%.

Анализируя фрактограммы чугуна, деформированного со степенью 60%, можно обратить внимание на то, что в поперечном сечении графитные включения выглядят шаровидными (рис. 8, а, в, д), зато в продольном сечении (рис. 8, б, г, е) приобретают гораздо более сложную вытянутую форму. Ее можно охарактеризовать терминами: «веретенообразная» (рис. 8, е) либо как «шаровидная с отходящими в направлении деформации коническими отростками, сужающимися к окончанию» (рис. 8, б). Кажущаяся на поперечных образцах шаровидной форма графита на самом деле представляет собой сохранившееся шаровидное ядро включения, от которого отломались вытянутые конические отростки – «усы». Эту версию подтверждает и рис. 8, г, где показано продольное расположение такого включения: его шаровидное ядро выкрошилось, заметна сферическая воронка от него, зато сохранилась вытянутая часть «усов» (располагается в правой части рис. 8, г горизонтально).

Границу отрыва «усов» от шаровидного «ядра» включения графита на поперечных образцах трудно четко идентифицировать из-за того, что «ядро» образовано из множества чешуек. Отрыв или если так можно выразиться «вылущивание» «усов» от «ядра» происходит по некой поверхности вдоль окружающих чешуек. Сохранившееся как составная часть вытянутого включения ядро внешне ничем не отличается от исходного шаровидного включения литого чугуна (но, разумеется, меньше его по диаметру). Иногда на ядре сохраняются обломки и остатки оторвавшихся «усов» (их можно наблюдать в центре рис. 8, а, в) в виде перпендикулярно и наклонно расположенных чешуек. В продольном сечении обломанные «усы» заметны гораздо нагляднее (например, в левой части рис. 8, б слева представлена воронка, справа – сохранившийся «ус»).

Что касается вопроса, является ли деформированное со степенью 60% включение графита целостным, а если разрушается, то каким образом и на какие фракции, можно сделать следующие заключения:

1. Дробления включений до уровня порошкообразной субстанции не происходит.
2. Включения графита испытывают пластическую деформацию. Однако деформация затрагивает не весь объем включения, а распределяется по его сечению, причем весьма неравномерно и специфически.
3. Деформации подвергаются лишь наружные слои включения. Они из-за своей слоистой структуры «сползают», если так можно выразиться, как чулок, вдоль чешуек центрального «ядра» и образуют вытянутые в направлении течения металла своеобразные отростки (выше мы уже предложили для их обозначения термин – «усы»).
4. Центральная часть графитного включения (так называемое «ядро»), по крайней мере, до степени деформации 60% сохраняется целостным и неповрежденным, имеет слоистое строение, характерное для литого чугуна, а также шаровидную форму, но меньшего диаметра, чем недеформированное включение.
5. Вопрос о том, являются ли вытянутые отростки («усы») графитного включения при деформации 60% монолитной субстанцией или состоят из раздробленных частей, пока для нас остается открытым. С одной стороны, на рис. 8, е включение выглядит монолитным, с другой – анализируя рис. 8, г, можно обратить внимание, что «усы» в правой части рисунка выглядят состоящими из нескольких раздробленных блоков.

В качестве отличия изломов чугуна, деформированного со степенью 60% от степени 20%, а также от литого состояния, можно отметить следующее:

1. Кардинально меняется характер разрушения графитных включений; если в литом и деформированном со степенью 20% образце включение не разрушалось, а сохранялось неповрежденным в одной



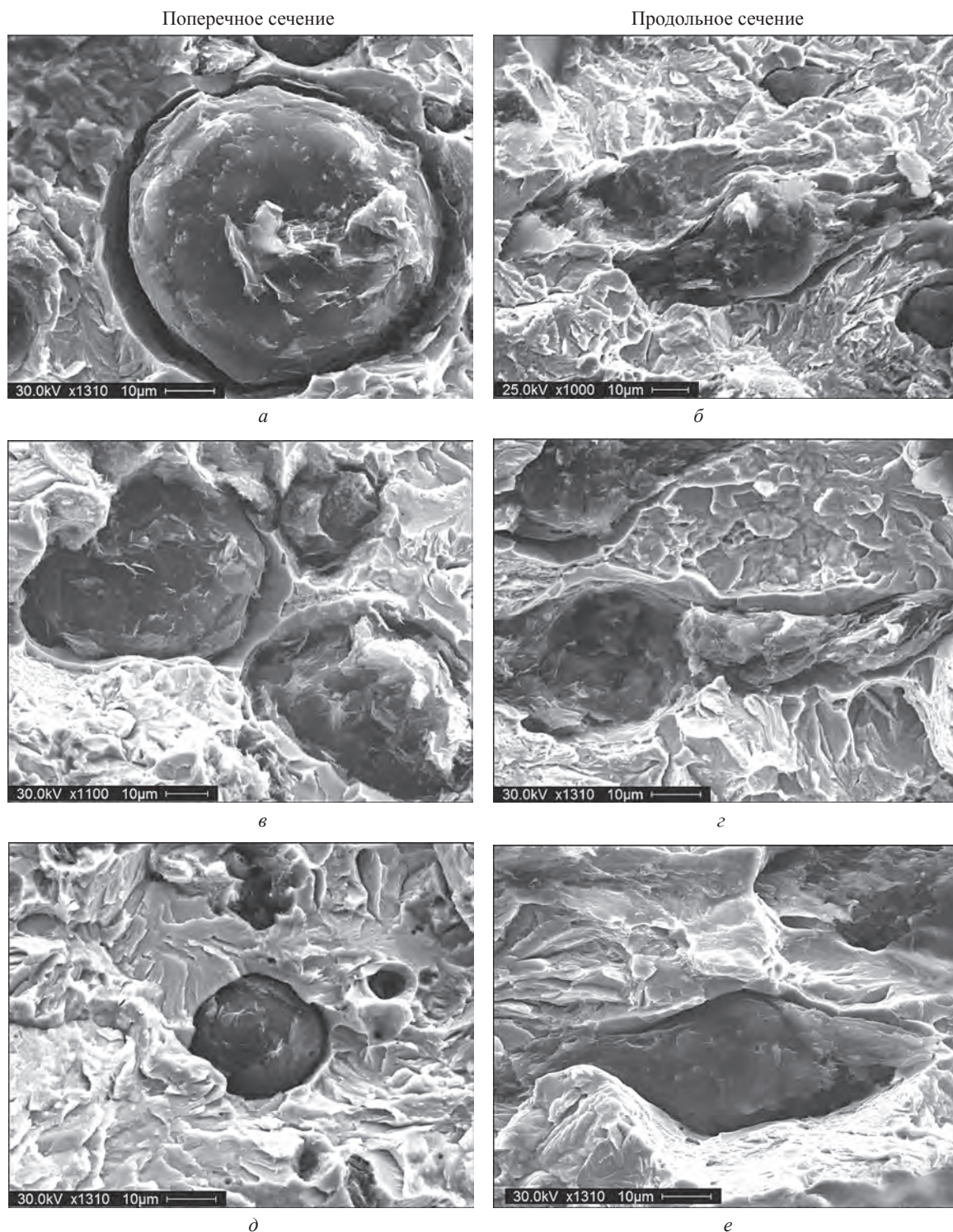


Рис. 8. Поверхность излома высокопрочного деформированного чугуна. Степень деформации 60%. *а, в, д* – поперечное сечение; *б, г, е* – продольное сечение. *а, г, д, е* –  $\times 1310$ ; *б* –  $\times 1000$ ; *в* –  $\times 1100$

из половинок образца либо вырывалось неповрежденным из металлической матрицы, то при 60% «усы» могут отрываться от «ядра» (характерный пример такого отрыва приведен на рис. 8, *г*).

2. При степени деформации 60% кратеры и ямки на поверхности металлической матрицы имеют меньшие диаметры. Что касается типа металлической матрицы, то она сохраняется в основном перлитной. Присутствует лишь тонкая ферритная оторочка светлого цвета вокруг включения графита (рис. 8, *а, е*), которая носит вязкий характер разрушения. Излом же перлитной матрицы сохраняет хрупкий характер, разрушение проходит по колониям перлита, в частности вдоль пластин цементита (характерные веерообразные сколы можно наблюдать, например, на рис. 8, *д, е*), однако размеры фасеток при степени деформации 60% немного меньше, чем в литом состоянии.

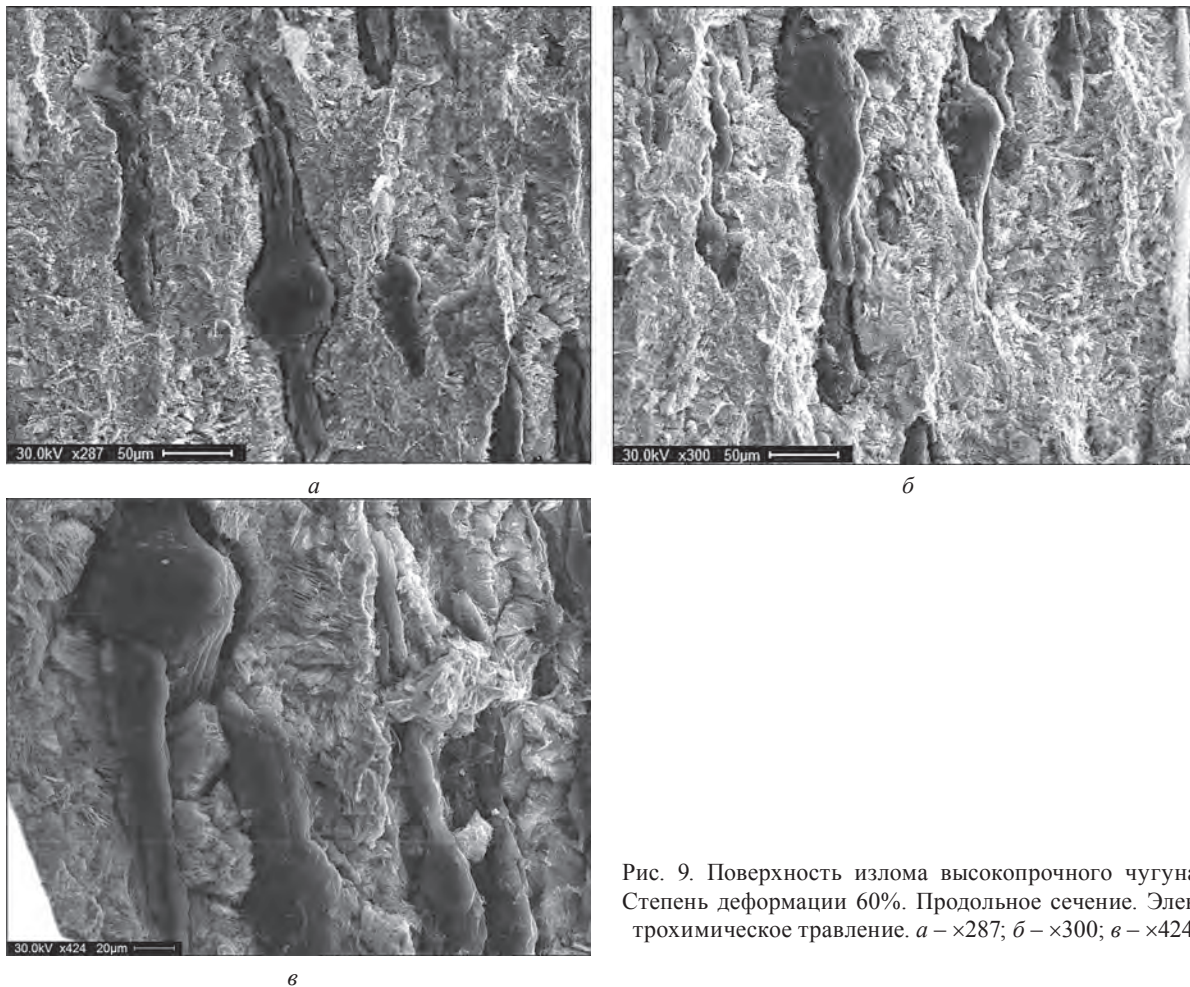


Рис. 9. Поверхность излома высокопрочного чугуна. Степень деформации 60%. Продольное сечение. Электрохимическое травление. *a* –  $\times 287$ ; *b* –  $\times 300$ ; *в* –  $\times 424$

Использование электрохимического травления дает возможность более детально исследовать изменения, происходящие с графитным включением в высокопрочном чугуне, деформированном со степенью 60% (на рис. 9 для большей наглядности приведены изломы только продольных сечений).

На рис. 9 показано, что с помощью электрохимического вытравливания можно добиться вытравливания включений графита из металлической матрицы более чем на  $2/3$  их абсолютных размеров. Причем полученный результат свидетельствует о том, что включения испытали пластическую деформацию, но при этом сохранили целостность (рис. 9, *a, б*). Заметны параллельно располагающиеся террасы (справа от основного сферического тела графитного ядра, рис. 9, *в*). Вероятно, это полосы скольжения и можно предположить, что пластическое течение графита происходит путем множественных сдвигов слоев оболочки с ядра.

Электрохимическое вытравливание позволило наглядно продемонстрировать, что вытягивание «усов» может происходить по двум, а иногда и по трем параллельным осям. При этом окончания «усов» могут разделяться на несколько волокон, раздваиваясь (на рис. 9, *б* показаны два отростка внизу включения), а иногда разделяясь даже на три «ответвления» (вверху рис. 9, *a* – три отростка вверху включения).

Таким образом, данные фотографии свидетельствуют в подавляющем большинстве случаев о пластической деформации хрупких включений графита с сохранением их целостности. Возможная линия разрыва между «ядром» и «усом» просматривается только на рис. 9, *в*.

#### Исследование фрактограмм чугуна, деформированного со степенью 80%

У чугуна, деформированного со степенью 80%, поверхность разрушения металлической матрицы становится еще более однородной (рис. 10), что объясняется большим измельчением зерна по сравнению с предыдущими степенями деформации (20 и 60%), а также литым состоянием.

При степени деформации 80% преимущественно хрупкий характер излома металлической матрицы сохраняется, что обусловлено присутствием цементитной составляющей перлита. Можно отметить, что

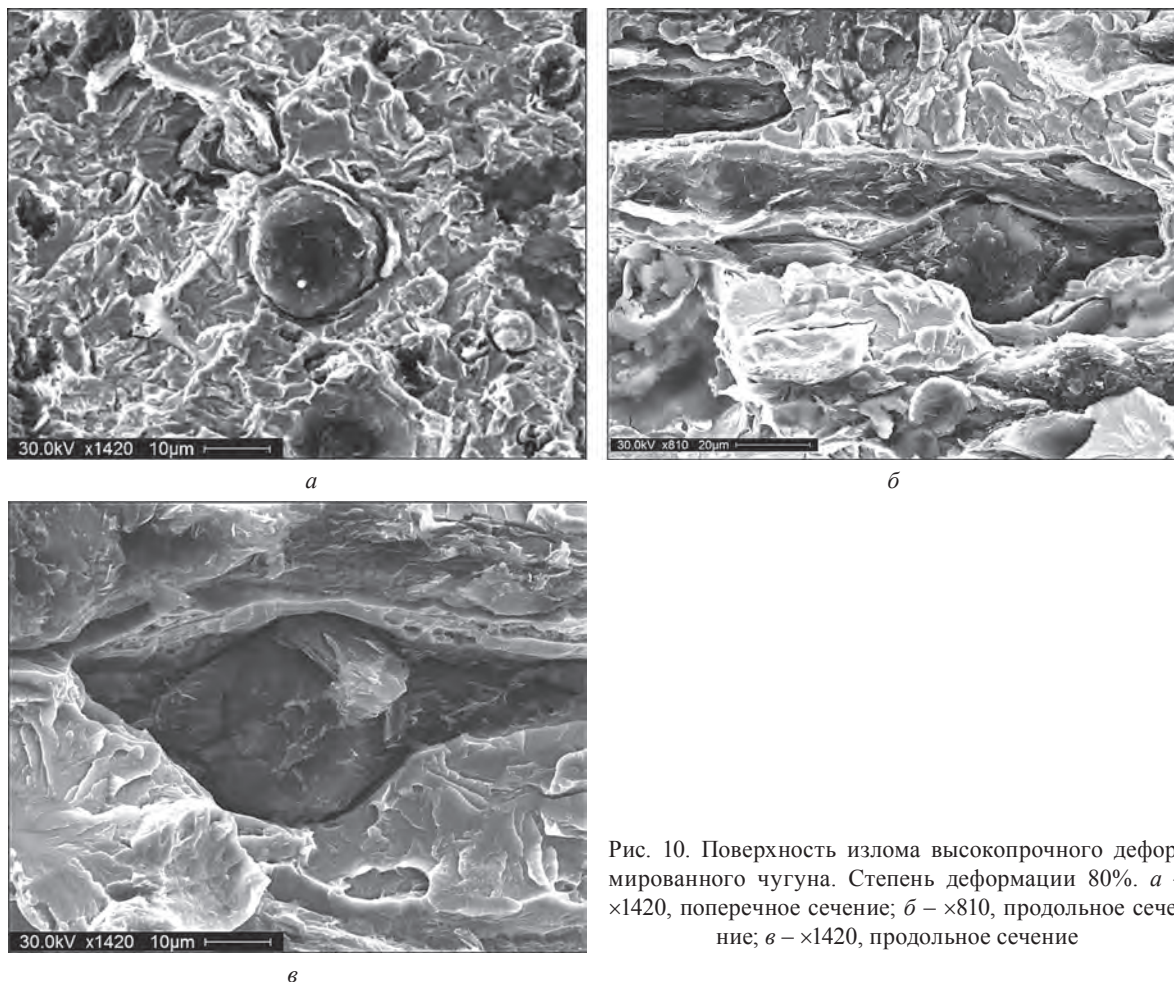


Рис. 10. Поверхность излома высокопрочного деформированного чугуна. Степень деформации 80%. *а* –  $\times 1420$ , поперечное сечение; *б* –  $\times 810$ , продольное сечение; *в* –  $\times 1420$ , продольное сечение

ферритная оторочка вокруг включений графита практически отсутствует. Включения графита имеют меньшие диаметры (в поперечном сечении) и большую степень вытянутости (в продольном сечении) по сравнению с образцами, деформированными с меньшими степенями деформации 20 и 60%.

В поперечном сечении при степени деформации 80%, так же как и при деформации 60%, включения графита выглядят как имеющие сферическую форму. На самом деле, как уже было показано выше, у них просто механически обломаны вытянутые отростки. Сохранившиеся «усы» хорошо видны на продольных сечениях (сравним рис. 10, *а* и 10, *б*).

Использование дополнительного электрохимического травления позволило выявить кардинальное отличие характера изменения формы графитных включений при степени деформации 80%. Оно заключается в том, что процесс пластической деформации захватывает теперь уже все включение полностью. Отличие характера деформации графитных включений хорошо заметно при сравнении рис. 9, *а* и 10.

Наиболее характерный вид включений графита после деформации чугуна со степенью 80% в виде остроконечных вытянутых веретен представлен в продольном сечении (рис. 11). Следует отметить, что при степени деформации 80% недеформированное ядро графита сферической формы сохраняется лишь в редких случаях (см. рис. 10), наиболее же характерным является наличие веретенообразных включений (рис. 11).

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, 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 целый порядок больше – 167,6 Дж/моль. Существенная разница в энергиях связи обеспечивает легкую подвижность слабо связанных между собой слоев. Пластическая деформация происходит за время около 1 с (столько длится процесс выдавливания) путем сдвига целых слоев графита, после чего практически мгновенно возника-

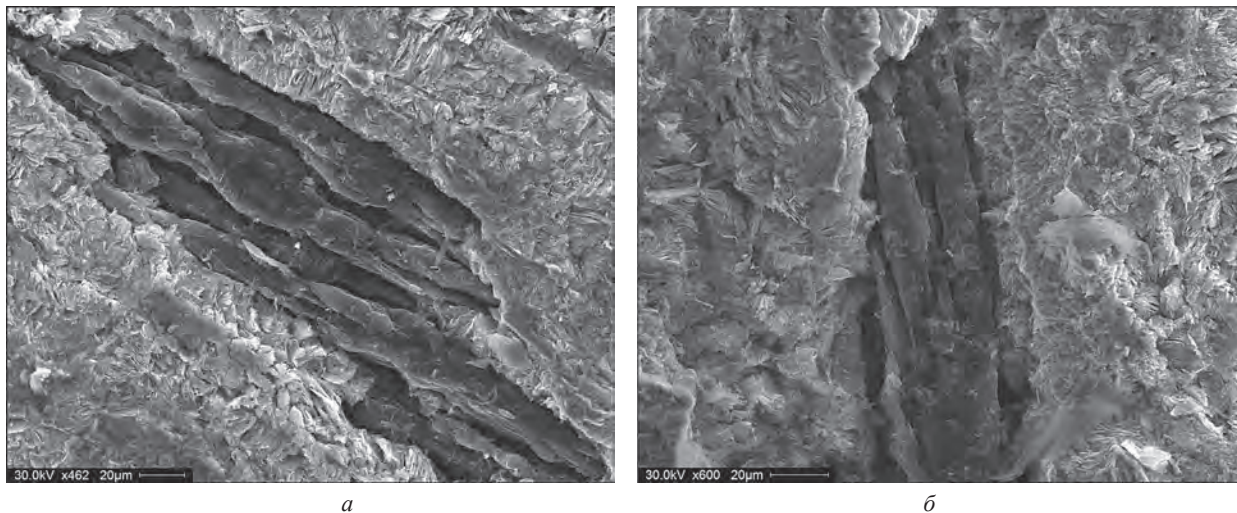


Рис. 11. Поверхность излома высокопрочного деформированного чугуна. Степень деформации 80%. Продольное сечение. Электрохимическое травление. *a* –  $\times 462$ ; *б* –  $\times 600$

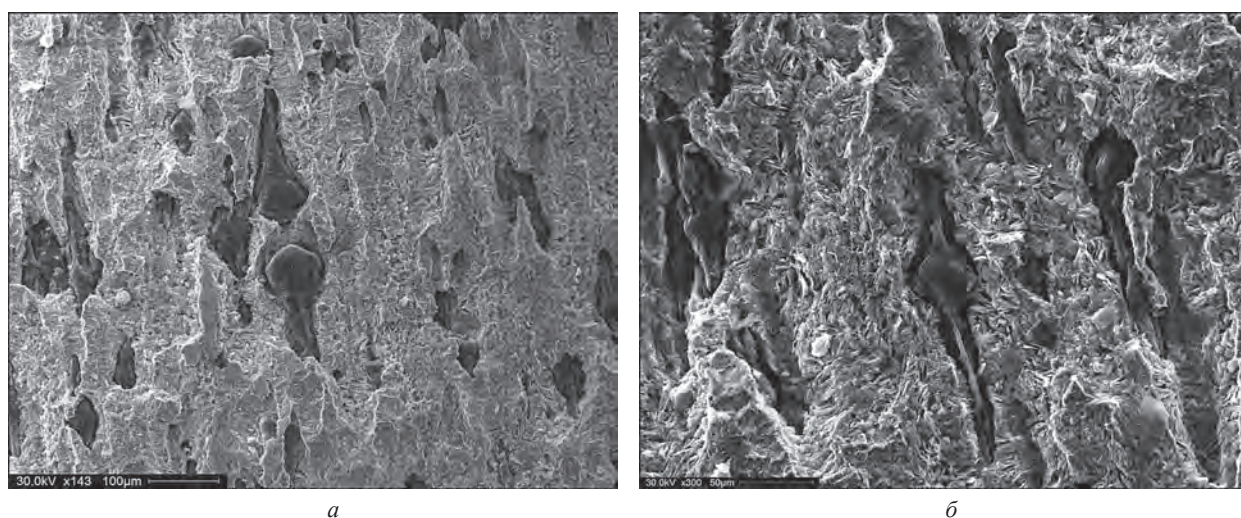


Рис. 12. Поверхность излома высокопрочного деформированного чугуна. Степень деформации 80%. Продольное сечение. Электрохимическое травление. *a* –  $\times 143$ ; *б* –  $\times 300$

ют новые связи между атомами в соседних слоях и сплошность включения сохраняется. Однако это предположение является гипотезой и требует дополнительных исследований и доказательств.

В сущности основными факторами, обеспечивающими пластическое течение графита без разрушения, являются два (технологический и структурный):

1. Использование схемы неравномерного всестороннего сжатия и наличие противодействия на выходе деформированного прутка из штамповой оснастки. Как известно, при выдавливании наружные слои прутка тормозятся из-за трения о матрицу, а течение внутренних слоев их опережает. Противодействие выравнивает скорости истечения чугуна и позволяет избежать трещин.

2. Наличие в структуре, окружающей графит, пластичной оболочки в виде перлитной, а лучше перлитно-ферритной металлической матрицы. Наиболее же благоприятным является такое сочетание: графит в ферритной оторочке. Пластичные оболочки для деформации хрупких сред использовали классики обработки материалов давлением Т. Карман, Р. Беккер и П. В. Бриджмен [16]. Они доказали, что даже хрупкие материалы типа мрамора в пластичной стальной оболочке в условиях неравномерного всестороннего сжатия могут получать пластические деформации без разрушения.

Для случая чугунов можно предположить, что отсутствие или недостаточная толщина такой оболочки с одной из сторон графитного включения уменьшит его деформируемость. Иллюстрация этому представлена на рис. 12, *a*: два включения, расположенные вдоль оси деформации, причем очень близко между собой. Как видно из рисунка, при малом расстоянии между включениями толщины окружающей пластичной оболочки оказывается недостаточно, для того чтобы «вовлечь» графит в пластическое течение. Можно предположить (рис. 12, *a*), что минимальным «критическим» расстоянием между включениями

является  $\frac{1}{2}$  их диаметров. В результате происходит лишь если так можно выразиться «односторонняя» деформация: а именно, то включение, которое расположено выше на рис. 12, *а* течет вверх, а расположенное ниже – течет вниз, округлая же форма обоих включений с той стороны, где оболочка тонкая, сохранилась неизменной. В случае, когда включения графита располагаются от соседних на расстоянии более чем  $\frac{1}{2}$  своего диаметра, его деформация проходит равномерно с обоих концов с образованием симметричных «усов-отростков» (сравним рис. 12, *а* с рис. 12, *б*).

### Выводы

1. Представлены результаты сравнительных исследований фрактограмм высокопрочного чугуна в литом состоянии и после горячей пластической деформации.

2. Показан характер изменения структуры металлической матрицы по мере увеличения относительной степени деформации от 0 (литое состояние) до 80%. Излом литого чугуна носит смешанный характер и включает в себя как зоны хрупкого межзеренного излома с преимущественным разрушением по границам зерен (в большинстве случаев), так и с элементами пластической деформации ферритной составляющей. Излом деформированного чугуна также носит смешанный хрупковязкий характер, но более мелкозернистый, в нем возрастает доля перлитной составляющей из-за ускоренного охлаждения на воздухе.

3. Представлен характер изменения формы и морфологии включений графита по мере увеличения степени деформации. При помощи метода электрохимического вытравливания и специально разработанных устройств, позволяющих избирательно растворять металлическую матрицу с постепенным «обнажением» поверхности включений, впервые наглядно продемонстрировано, как в аксонометрии выглядят деформированные включения графита.

4. Впервые экспериментально доказано, что в чугуне включения графита, считающиеся до сих пор хрупкими, при деформации в условиях неравномерного всестороннего сжатия (при температурах порядка 900–1000 °С) пластически деформируются, причем без разрушения. Дробления включений до уровня порошкообразной субстанции не происходит, они остаются монолитными.

5. Пластическая деформация графита до определенной степени деформации (60%) затрагивает не весь объем включения, а распределяется по его сечению, причем неравномерно, а весьма специфически.

6. До степени обжатия 60% деформации подвергаются лишь наружные слои включения, которые из-за своей слоистой структуры «сползают» вдоль чешуек центрального «ядра», как некий «чулок», и образуют вытянутые в направлении течения металла своеобразные отростки («усы»). Образование вытянутых отростков («усов») может происходить по двум, а иногда и по трем параллельным осям, при этом окончания «усов» могут разделяться на несколько волокон, раздваиваясь, а иногда даже делясь на три «ответвления». Центральная часть включения («ядро») по крайней мере до степени деформации 60% сохраняется цельным и неповрежденным, имеет слоистое чешуйчатое строение, шаровидную форму, но меньшего диаметра, чем недеформированное включение. В «ядре» сохраняется присущая исходному сферическому включению радиальная структура.

7. Значительное изменение характера деформации включений графита происходит по достижению степени деформации 60% и наиболее заметно при степени деформации 80%. Однозначно установить его удалось после электрохимического вытравливания слоя металлической матрицы. Данное отличие заключается в том, сферическое ядро во включении графита уже отсутствует, а процесс пластической деформации захватывает все включение целиком, оно приобретает вид остrokонечных вытянутых веретен.

8. Показано, что пластическая деформация высокопрочных чугунов с феррито-перлитной основой и включениями хрупкого графита в ферритной оторочке (типа так называемый «бычий глаз») является примером общего случая деформации гетерогенных материалов, в которых хрупкая фаза расположена внутри пластичной основы.

9. Подтверждено, что наиболее важным фактором успешной пластической деформации чугуна является использование схем, обеспечивающих условия, близкие к всестороннему сжатию. Помимо получения бездефектных поковок, это позволяет пластически деформировать такую хрупкую фазу, как графит в структуре чугуна.

10. Основными факторами, обеспечивающими пластическое течение графита без разрушения, являются два: использование схемы неравномерного всестороннего сжатия и наличие «подпора» (противодавления) на выходе деформированного прутка из матрицы, что позволяет сблизить скорости истечения внутренних слоев прутка с наружными, тормозимыми за счет трения о стенки штамповой матрицы; на-

личие окружающей графит гораздо более пластичной оболочки в виде перлитной, а лучше перрито-ферритной матрицы, причем наиболее благоприятным является случай, когда графит находится в ферритной оторочке.

11. Большое внимание мы уделили в данной статье доказательству, казалось бы, сугубо теоретической дилеммы, а именно того, что же происходит с графитом в чугунах при его деформации: включения подвергаются пластическому течению или же дробятся и рассыпаются в порошкообразную субстанцию, на самом деле имеют важную практическую значимость. Очевидно, что доля площади, занимаемой графитными включениями по отношению ко всей площади шлифа, существенно изменяется по мере роста степени деформации. Как известно, именно графитные включения обеспечивают высокие триботехнические (в первую очередь антифрикционные) характеристики у широкого круга изделий – от поршневых колец до толкателей клапанов двигателей. Регулируя степень деформации, можно целенаправленно управлять количеством и степенью вытянутости включений, а значит, и свойствами. Поэтому выяснение морфологии графита в деформированном чугунах очень важно для прогнозирования эксплуатационных характеристик деталей.

12. То, что большая часть включений графита в изломе деформированного высокопрочного чугуна оказалась не поврежденной (обнаружено весьма малое количество разрушенных включений), может изменить сложившееся мнение о роли графита, как о месте зарождения трещины. Что касается места зарождения трещины, то можно предположить, что это межфазная граница между включением графита и матрицей в той зоне, где графит расположен непосредственно в перлите, а не окаймлен ферритной оторочкой. Трещина распространяется от включения к включению графита, огибая, но не повреждая их.

13. Отмечены преимущества горячей пластической обработки как метода точного формообразования высококачественных деталей из чугуна. Даже при достаточно глубоком травлении не удалось выявить скрытых дефектов структуры в деформированном материале: поры, трещины, другие несплошности отсутствуют.

## Литература

1. Основы металлографии чугуна / К. П. Бунин, Я. Н. Малиночка, Ю. Н. Таран. М.: Metallurgija, 1969. 416 с.
2. Справочник по металлографическому травлению / М. Беккерт, Х. Клемм. Пер. с нем. М.: Metallurgija, 1979. 336 с.
3. Металлографическое травление металлов и сплавов: Справ. изд. / Л. В. Баранова, Л. М. Демина. М.: Metallurgija, 1986. 256 с.
4. ГОСТ 3443-87. Отливки из чугуна с различной формой графита. Методы определения структуры. М.: Стандартиформ, 2005. 42 с.
5. Пластическая деформация чугуна / Ю. Т. Антонишин. Минск: Навука і тэхніка, 1991. 119 с.
6. Горячая пластическая деформация чугуна: структура, свойства, технологические основы / А. И. Покровский. Минск: Беларуская навука, 2010. 256 с.
7. 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.
8. 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.
9. Покровский А. И. Пластическое течение включений цементита и графита при обработке давлением чугуна // Литье и металлургия. 2013. № 1 (69). С. 88–95.
10. Покровский А. И., Луцкий П. Е. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния и особенности структурообразования чугуна при горячем выдавливании // Литье и металлургия. 2014, № 4 (77). С. 33–44.
11. Энгель Л., Клингеле Г. Растровая электронная микроскопия. Разрушение: Справ. / Пер. с нем. М.: Metallurgija, 1986. 232 с.
12. Изломы конструкционных сталей: Справ. изд. / Л. П. Герасимова, А. А. Ежов, М. И. Маресев. М.: Metallurgija, 1987. 272 с.
13. Высокопрочный чугун в автомобилестроении / М. П. Шебашинов, Ю. Е. Абраменко, Н. И. Бех. М.: Машиностроение, 1988. 216 с.
14. Пат. Респ. Беларусь № 10650 от 02.02.2015 по заявке u20140426 от 20.11.2014. Покровский А. И. Устройство для выявления формы графитных включений в структуре чугуна.
15. Пат. Респ. Беларусь № 10652 от 02.02.2015 по заявке u20140426 от 20.11.2014. Покровский А. И. Устройство для выявления формы графитных включений в структуре чугуна.
16. Бриджмен П. В. Исследование больших пластических деформаций и разрыва. М.: Изд-во иностранной литературы, 1955. 444 с.

## References

1. Bunin K. P., Malinochka J. A. N., Taran Ju. N. *Osnovy metallografii chuguna* [Fundamentals of iron metallography]. Moscow, Metallurgija Publ., 1969. 416 p.

2. Bekkert M., Klemm H. *Spravochnik po metallograficheskomu travleniju* [Reference metallographic etching]. Moscow, Metallurgija Publ., 1979, 336 p.
3. Baranova L. V., Demina L. M. *Metallograficheskoje travlenije metallov i splavov* [Metallographic etching of metals and alloys]. Moscow, Metallurgija Publ., 1986. 256 p.
4. GOST 3443-87. *Otlivki iz chuguna s razlichnoj formoj grafita. Metody opredelenija struktury* [Castings of iron with various forms of graphite. Methods for determination of the structure]. Moscow, Standartinform Publ., 2005. 42 p.
5. Antonishin Ju. T. *Plasticheskaja deformatsija chuguna* [Plastic deformation of cast iron]. Minsk, Navuka i Tehnika Publ., 1991. 119 p.
6. Pokrovskij A. I. *Gorjachaja plasticheskaja deformatsija chuguna: struktura, svojstva, tehnologicheskije osnovy* [Hot plastic deformation of iron: structure, properties, processing base.]. Minsk, Belaruskaja navuka Publ., 2010. 256 p.
7. Chaus A. S., Sojka Ja., Pokrovckij A. I. Vlijanije gorjachej plasticheskoy deformatsii na izmenenija mikrostruktury chuguna s sharovidnym grafitom [Effect of hot plastic deformation changes the microstructure of nodular cast iron]. *Fizika metallov i metallovedenije – Physics of Metals and Metallography*, 2013, vol. 114, no. 1, pp. 94–104.
8. Pokrovskij A. I., Chaus A. S., Kunovskij E. B. Vlijanije formy grafitovyh vkljuchenij na akusticheskije harakteristiki izdelij iz litogo i deformirovannogo chuguna [Impact of the shape of graphite inclusions in the acoustic characteristics of products from cast and deformed iron]. *Metallovedenije i termicheskaja obrabotka metallov – Metal Science and heat treatment of metals*. 2011, no. 7, pp. 3–10.
9. Pokrovskij A. I. Plasticheskije techenije vkljuchenij tsementita i grafita pri obrabotke davlenijem chuguna [Plastic flow cementite and graphite inclusions in the processing of pressure cast iron]. *Lit'e i metallurgija – Foundry Production and metallurgy*, 2013, no. 1 (69), pp. 88–95.
10. Pokrovskij A. I., Luschnik P. E. Chislennoje modelirovanije naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija i osobennosti strukturoobrazovanija chuguna pri gorjachem vydavlivanii [Numerical simulation of stress-strain state and peculiarities of structure of iron during hot extrusion]. *Lit'e i metallurgija – Foundry Production and metallurgy*, 2014, no. 4 (77), pp. 33–44.
11. Engel' L., Klingele G. *Rastrovaja elektronnaja mikroskopija. Razrushenije* [Scanning electron microscopy. Destruction. Directory]. Moscow, Metallurgija Publ., 1986. 232 p.
12. Gerasimova L. P., Jezhov A. A., Maresev M. I. *Izlomy konstruktsionnyh stalej* [Fractures of structural steels: Reference Vol.]. Moscow, Metallurgija Publ., 1987. 272 p.
13. Shebatinov M. P., Abramenko Ju. E., Beh N. I. *Vysokoprochnyj chugun v avtomobilestrojenii* [High-strength cast iron in the automotive]. Moscow, Mashinostrojenije Publ., 1988. 216 p.
14. Pokrovskij A. I. *Ustrojstvo dlya vyyavleniya formy grafitnyh vkljuchenij v strukture chuguna* [An apparatus for detecting inclusions in the form of graphite structure of cast iron]. Patent RB, no. 10650, 2015.
15. Pokrovskij A. I. *Ustrojstvo dlya vyyavleniya formy grafitnyh vkljuchenij v strukture chuguna* [An apparatus for detecting inclusions in the form of graphite structure of cast iron]. Patent RB, no. 10652, 2015.
16. Bridzhmen P. V. *Issledovanije bol'shikh plasticheskikh deformatsij i razryva* [Study of large plastic deformation and fracture]. Moscow, Izdatel'stvo inostrannoj literatury Publ., 1955. 444 p.

### Сведения об авторе

Покровский Артур Игоревич, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси. ул. Купревича, 10, 220141, г. Минск, Беларусь. E-mail: arturu@tut.by.

### Information about the author

Pokrovsky Artur, Physical and Technical Institute of National Academy of Sciences of Belarus, 10 Kuprevich Str., Minsk, 220141, Belarus. E-mail: arturu@tut.by.