

УДК 669.017:539.37

И. Н. ХРОЛЬ

**ВЛИЯНИЕ ГОРЯЧЕЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА МОРФОЛОГИЮ ГРАФИТА И МЕТАЛЛИЧЕСКУЮ МАТРИЦУ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА***Министерство промышленности Республики Беларусь**(Поступила в редакцию 12.12.2014)*

**Введение.** Чугун является своеобразным композитным материалом, механические и эксплуатационные свойства которого зависят от характеристик металлической основы (прочность, пластичность, твердость и др.), а также формы, размеров, количества и распределения включений графита (упругость, пластичность). При этом решающее значение в ряде случаев имеют либо включения графита, либо металлическая основа.

В научной литературе существует мнение, что включения графита являются «надрезами», которые снижают его прочность и пластичность. Это происходит, во-первых, вследствие некоторого уменьшения «живого» сечения металла из-за полостей, занятых графитом, имеющим небольшую прочность на разрыв, и, во-вторых, что наиболее важно, из-за высокой концентрации напряжений, возникающей в зонах включений, особенно при его пластинчатой форме. Данные аспекты приводят к резкой локализации пластических деформаций в металлической основе и в итоге – к квазихрупкому разрушению материала при средних напряжениях и более низких показателях пластичности по сравнению со значениями прочности и пластичности металлической основы чугуна [1]. На практике необходимо свести к минимуму вредное влияние включений графита, повышая прочностные характеристики основы: 1) применение различных способов литья (модифицирование, графитизация), 2) термообработка, 3) обработка металлов давлением (ковка, штамповка, прессование и др.). Один из наиболее перспективных способов – использование метода деформирования по схеме всестороннего неравномерного сжатия, которая реализуется в технологических процессах выдавливания и прессования. Использование данного метода обеспечивает деформирование чугуна с высокими степенями деформации, которые значительно изменяют прочность и твердость, сопротивление коррозии и износу чугунных изделий [2, с. 87, 88].

Выбор рациональных режимов термической обработки в сочетании с пластической деформацией придает чугуну свойства конструкционного или инструментального материала, а также способствует получению особого комплекса физико-химических свойств [3, с. 241–245]. Деформированный высокопрочный чугун может применяться для изготовления ответственных изделий, используемых при повышенных нагрузках [4, с. 30–36]. Шаровидная форма графита в чугунных заготовках допускает применение больших пластических деформаций (порядка 80%). После деформации возможны различные режимы термической обработки, которые в разной степени изменяют механические свойства. Деформированный чугун характеризуется анизотропными свойствами, что следует учитывать при выборе режима термической обработки.

Цель данной работы – исследование особенностей влияния горячей пластической деформации на процессы формоизменения, перераспределения графита и на структуру металлической основы.

**Материал и методика исследования.** Для исследований использовали высокопрочный чугун марки ВЧ 50 (ГОСТ 7293–85) следующего химического состава: С 3,2–3,6%; Si 1,7–2,1%; Mn 0,5–0,7%; Ni 0,4–0,6%; Mg 0,04–0,06%, Р до 0,08%, S до 0,01%.

Выплавку металла осуществляли в 150-килограммовой индукционной печи с последующим модифицированием магниевой лигатурой марки ФСМг7 (7% магния), которую вводили в металл при 1400–1450 °С. Разливку металла осуществляли 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 выдавливания через коническую матрицу по схеме всестороннего неравномерного сжатия, заключающегося в использовании противодавления определенного усилия на выходе прутка. Степень деформации варьировали от 20 до 80% посредством изменения диаметра исходной заготовки таким образом, чтобы вся номенклатура получаемых деформацией прутков была одинакового диаметра (12,5 мм).

Процесс деформирования проходил в несколько стадий: заготовки нагревали с помощью токов высокой частоты (в печи ТВЧ) до 900–1000 °С, затем помещали в штамп, деформировали и на последней стадии охлаждали на воздухе. Для снятия внутренних напряжений в металле применяли термическую обработку. Для улучшения свойств металлической матрицы возможны различные схемы охлаждения (закалка в масле или в воде), которые позволяют получить бейнитную структуру. Однако в данных опытах не применяли ускоренное охлаждение.

Металлографические исследования проводили на металлографическом комплексе МИКРО-200, микротвердость определяли на приборе Dugamin 5 при нагрузке 100 г с выдержкой 12 с. Для выявления микроструктуры перед исследованием на световом микроскопе образцы подвергали травлению в 4% -ном растворе  $\text{HNO}_3$  в этиловом спирте.

При количественном анализе микроструктуры использовали программу «IMAGE SP». Вначале выбирали характерный участок на шлифе. Последний при увеличении 100 с помощью видеокамеры выводили на монитор персонального компьютера, проводили обсчет площадей включений графита. При этом учитывали требования ГОСТ 5639–82 «Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна», согласно которому обработка включений, расположенных на краях изображения и «перерезанных» изображением, не проводится.

Следует отметить, что при количественном подсчете включений графита учитывались особенности приготовления шлифа чугунного образца. Некоторые этапы этой процедуры приведены на рис. 1.

**Результаты эксперимента и их обсуждение.** Микроструктура высокопрочного чугуна в исходном нетравленном состоянии приведена на рис. 1, а. Согласно ГОСТ 3443–87, указанная на рисунке структура соответствует следующему описанию:

форма включений графита правильная шаровидная (Гфш1);

размер наибольшего включения графита в структуре (Гшд3) от 40 до 60 мкм;

площадь, занятая включениями графита (Гш10), от 8 до 10%;

большое количество мелких включений графита;

микроструктура в травленном состоянии представляет собой ферритно-перлитную смесь (рис. 2). Площадь, занятая перлитом П70 (от 65 до 80%).

Ферритные участки имеют форму, которая часто встречается в высокопрочных чугунах (так называемый «бычий глаз»): феррит локально сконцентрирован вокруг графита, образуя своеобразную оболочку вокруг его включений (рис. 2, а).

Перлит дисперсный соответствует обозначению Пд0,3. Внутреннее строение перлита при увеличении 400 проявляется недостаточно (рис. 2, б). На рис. 2, в приведена морфология поверхности перлита при увеличении 2000. Он имеет характерное строение, однако наблюдается высокая дисперсность цементитных составляющих.

При этом количественный анализ микроструктуры показал, что площадь включений графита составляет порядка 11% на фотографируемых участках поверхности шлифа.

Металлографические исследования образцов, подвергнутых температурному воздействию (по сравнению с исходными), показали существенные изменения микроструктуры металлической матрицы, которые происходят после воздействия высокой температуры в литом высокопрочном чугуне. В результате нагрева происходят диффузионные процессы, влияющие на дисперсность структуры металлической матрицы (рис. 3).

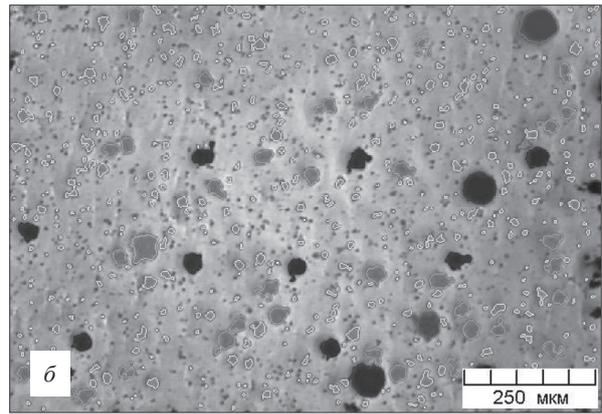
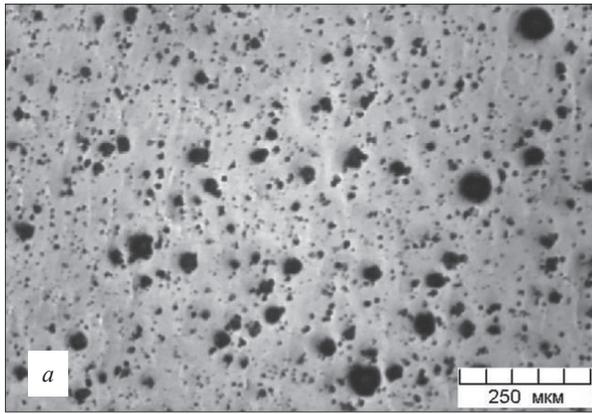


Рис. 1. Основные стадии методики выделения характерных включений графита для обсчета его количества в образце литого чугуна марки ВЧ 50: *а* – микроструктура поверхности; *б* – выделение всех имеющихся на шлифе темных участков; *в* – редактирование снимка для обсчета площадей с вычленением дефектов приготовления шлифа; нетравлено,  $\times 100$

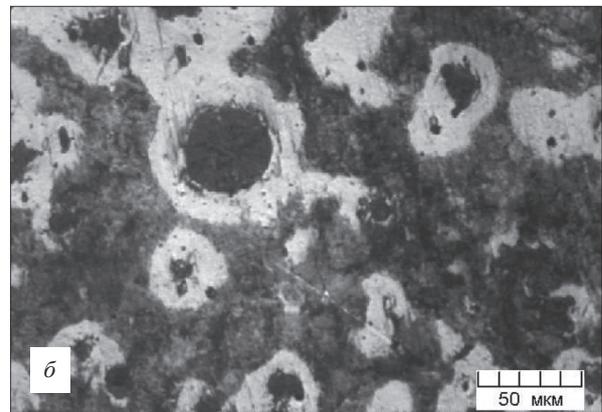
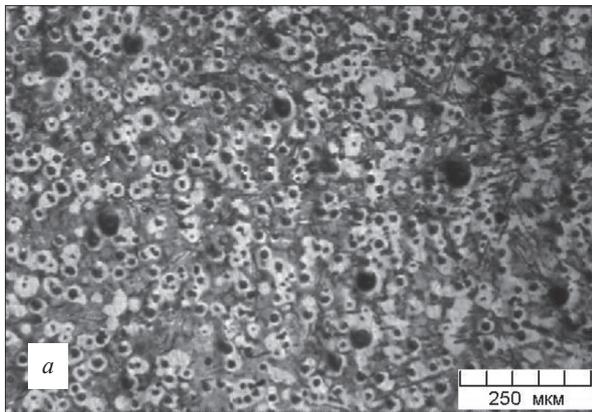
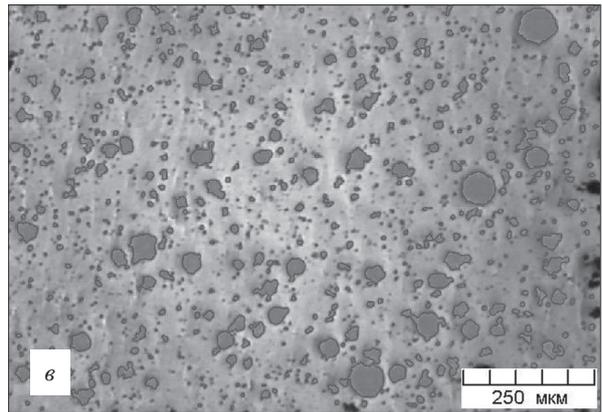
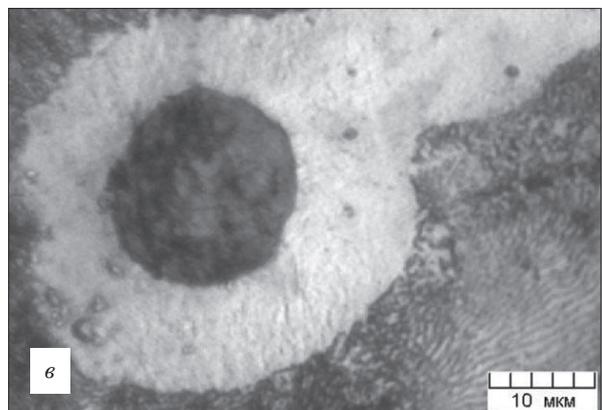


Рис. 2. Микроструктура высокопрочного чугуна ВЧ 50 в исходном (литом) состоянии: *а*, *б*, *в* – травлено нитратом,  $\times 100$ ,  $\times 400$ ,  $\times 2000$  соответственно



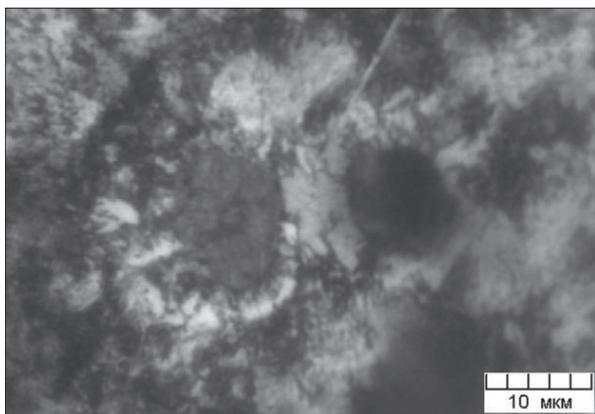


Рис. 3. Микроструктура высокопрочного чугуна ВЧ 50, подвергнутого температурному воздействию (нагрев до 900–1000 °С) с последующим охлаждением на воздухе; травлено ниталем,  $\times 2000$

Изменение нетравленной микроструктуры высокопрочного чугуна под действием горячей пластической деформации иллюстрирует рис. 4, где показаны микрофотографии поперечного сечения нетравленных шлифов с различными степенями деформации (20, 60, 80%).

Под воздействием горячей пластической деформации поперечное сечение заготовки уменьшается, а продольное сечение увеличивается (рис. 5, *а*, *б*, *в*), такие же изменения происходят и с включениями графита. В то же время, на увеличение твердости чугуна при деформировании влияют два фактора: наклеп при деформации и фазовые превращения на границе раздела. С увеличением степени деформации наблюдается уменьшение ферритной оторочки вокруг включения графита. Это явление можно объяснить

процессами диффузии и растворения углерода, протекающими под воздействием высокой температуры и напряжений, возникающих при деформировании. При этом феррит оказывается предельно насыщенным углеродом, избыток которого вследствие уменьшения растворимости при понижении температуры начинает выделяться в виде сложных карбидных образований по границам зерен [5, с. 120, 121].

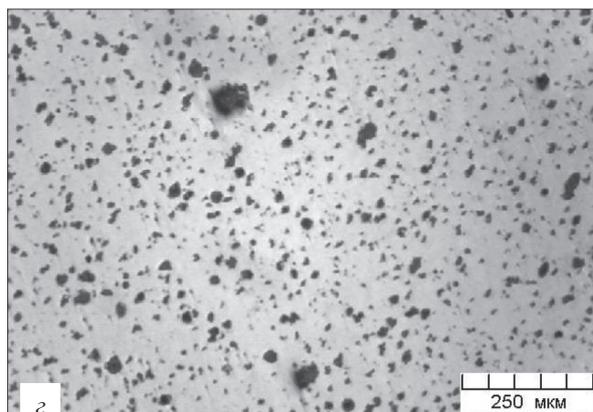
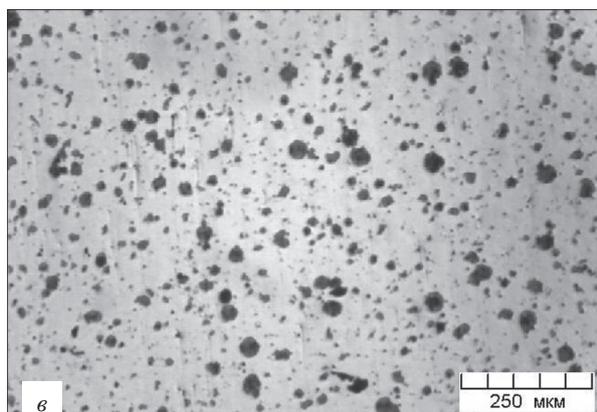
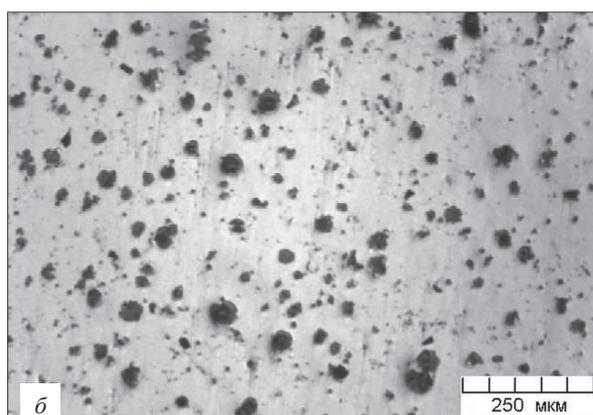
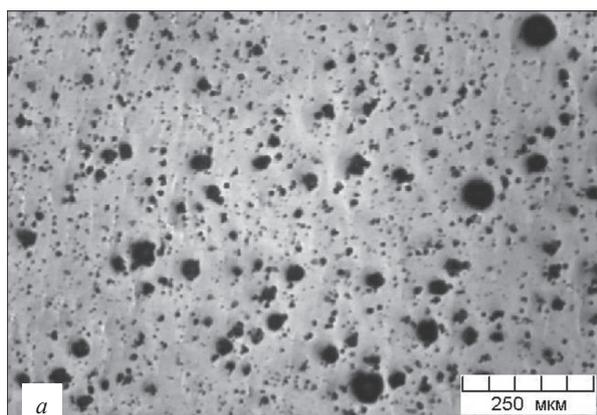


Рис. 4. Микроструктура высокопрочного чугуна ВЧ 50 в литом и деформированном состояниях (поперечное сечение): *а* – исходный образец; *б* – 20% деформации; *в* – 60%; *г* – 80%; нетравлено,  $\times 100$

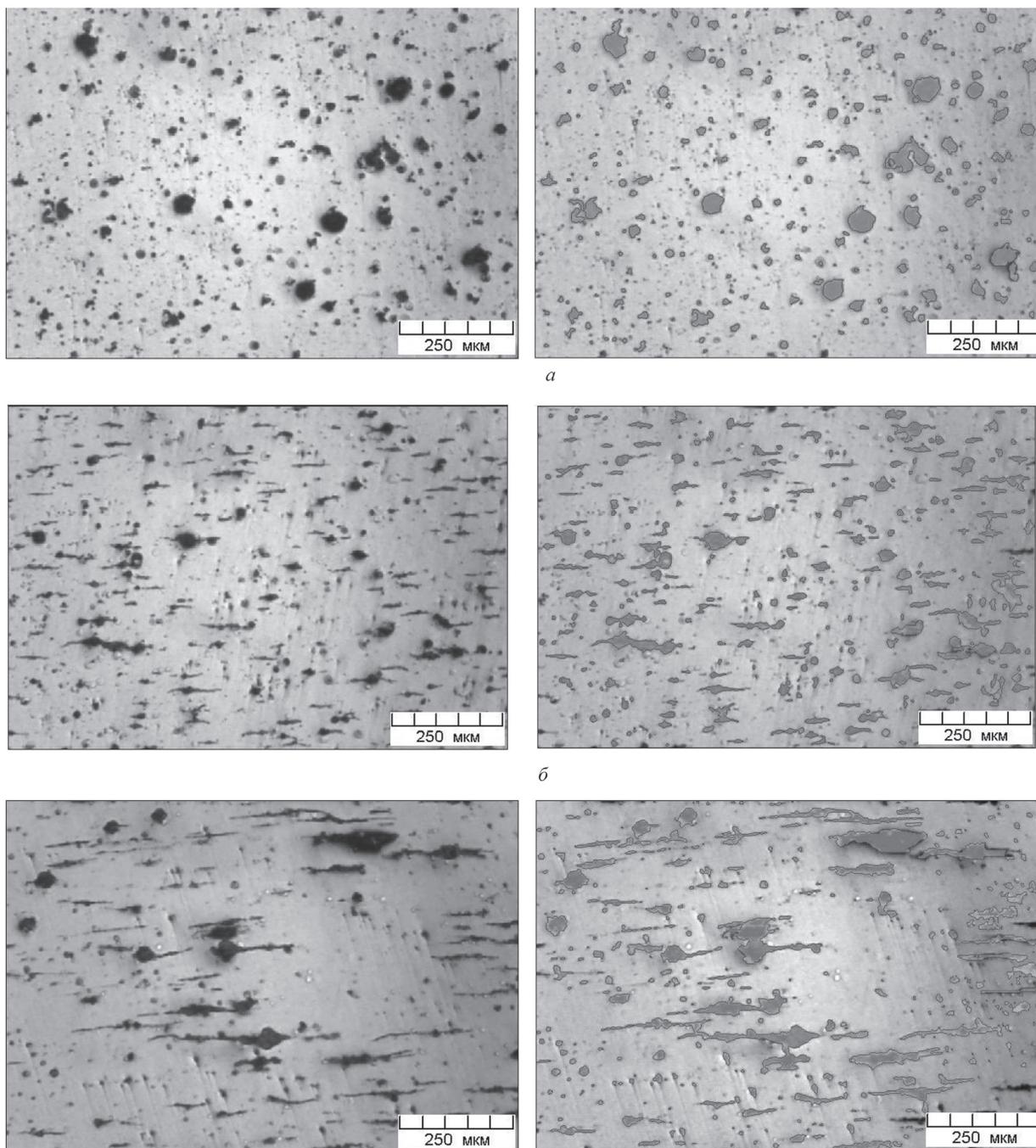


Рис. 5. Микроструктура высокопрочного чугуна ВЧ 50 и маски включений графита в продольном сечении образцов при различной степени деформации: *а* – 20%; *б* – 60%; *в* – 80%; нетравлено,  $\times 100$

При деформировании зерна металлической основы и включения графита меняют свою форму и ориентировку, образуя веретенообразную структуру с преимущественной направленностью графита вдоль оси выдавливания. При значительных степенях деформации происходит разворот беспорядочно ориентированных зерен осями наибольшей прочности вдоль направления течения металла. Зерна деформируются и сплющиваются, вытягиваются в направлении действующих сил, образуя волокнистую структуру.

С увеличением степени деформации растет число зерен, которые получают преимущественную ориентировку. Образование текстуры способствует появлению анизотропии свойств (вдоль и поперек течения металла) [6, с. 61].

С ростом степени деформации механические свойства ( $\sigma_b$ ,  $\sigma_T$ , НВ), характеризующие сопротивление деформации, повышаются, происходит деформационное упрочнение [6, с. 61]. Последнее объясняется существенным повышением плотности дислокаций, характерным для процесса пластической деформации. С ростом плотности дислокаций и несовершенств кристаллического строения затрудняется их свободное перемещение. Дополнительные барьеры для дислокаций создаются за счет деформации зерен и дробления блоков. Данные факторы способствуют упрочнению металла [6, с. 62].

Рассматривая формоизменение одного конкретного включения графита, можно предположить, что изменения площади в продольном и поперечном направлениях будут иметь линейный характер. Однако необходимо учитывать, что при проведении обседа площади включений графита рассматривается не одно включение, а определенный участок поверхности образца, на котором находится разное количество включений. Изменение расположений включений графита на исследуемых участках образцов связано с ростом степени деформации, которая в нашем случае характеризуется увеличением начального диаметра заготовок при постоянном конечном диаметре (12,5 мм). При таком подходе происходит существенное перемещение включений графита, которое может вызвать неравномерное изменение площади по сечениям.

При  $\epsilon = 20\%$  происходит незначительное уменьшение площади включений графита (в поперечном сечении около 7%, в продольном сечении 10%). Площадь включений графита в поперечном сечении изменилась вследствие их вытягивания вдоль оси деформирования. С ростом величины деформации до  $\epsilon = 60\%$  включения графита продолжают вытягиваться вдоль оси деформирования, их эллипсообразная форма постепенно преобразуется в веретенообразную форму (рис. 6). При этом площадь включений графита в поперечном направлении (около 8%) больше, чем в продольном направлении. Это объясняется перемещением включений графита в металлической матрице в процессе деформации.

При деформировании заготовки ( $\epsilon = 80\%$ ) включения графита приобретают вытянутую форму в виде игл и веретен. Ввиду значительного перемещения и формоизменения включений графита в продольном сечении занимаемая ими площадь увеличивается (порядка 12%) и уменьшается в поперечном сечении до 5%.

Главная проблема при исследовании формоизменения включений графита при рассмотрении металлографических шлифов – невозможность оценки динамики изменения конкретного участка с определенным набором включений.

Следующий этап исследования – дифференциация включений по размерным группам (0–20; 20–40; 40–60 мкм; более 60 мкм) для выявления изменений, вызванных увеличением степени деформации (рис. 6).

Проведенные металлографические исследования поперечного сечения образцов деформированного чугуна, связанные с распределением по размерным группам, показали следующее.

1. В исходном (литом) состоянии преобладают включения, принадлежащие размерным группам 0–20 и 20–40 мкм.

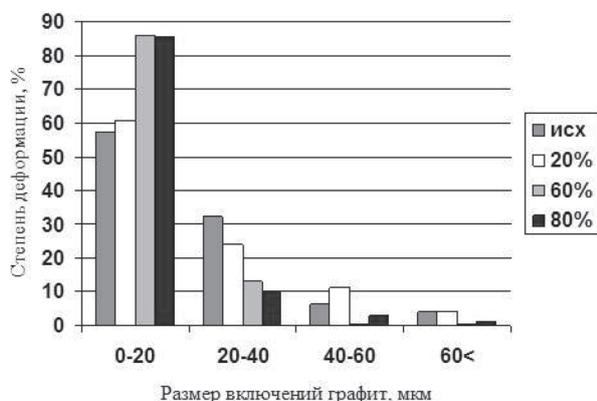


Рис. 6. Гистограмма зависимости размера включений графита (разбитых по фракциям) от степени деформации

2. При степени деформации 20% происходит уменьшение количества включений, принадлежащих размерной группе 20–40 мкм, и увеличение числа включений, принадлежащих размерной группе 40–60 мкм.

3. При степени деформации 60% преобладают включения небольших размеров (0–20 и 20–40 мкм).

4. У образцов со степенью деформации 80% наблюдается незначительный рост включений графита размером более 60 мкм, который можно объяснить объединением нескольких мелких включений в одно.

5. Число мелких включений (0–20 мкм) существенно возрастает. Если в исходном состоя-

нии их количество составляло около 58%, то при степени деформации 80% оно увеличилось до 86%. Данный факт объясняется следующими предположениями:

с увеличением степени деформации больше 80% может происходить разделение крупных включений графита на несколько мелких;

при деформировании образцы подвергаются высокотемпературному воздействию и в структуре чугуна появляются зародыши новых зерен, возникающие на участках с повышенной плотностью дислокаций, т. е. у границ деформированных зерен (блоков) или плоскостей сдвига внутри зерен. Затем их объем увеличивается в результате присоединения перемещающихся атомов от деформированных участков [5, 8].

Данные предположения свидетельствуют о разнонаправленных процессах, происходящих при деформировании и изменяющихся с ростом степени деформации.

Учитывая, что включения графита влияют на антифрикционные свойства [8–11], то, регулируя количество и дисперсность включений, можно получить заданные триботехнические характеристики.

**Заключение.** Изменение площади включений графита на исследуемых участках носит нелинейный характер в связи с разными (в зависимости от степени деформации) начальными диаметрами образцов и равными конечными диаметрами.

С изменением степени деформации происходит перераспределение включений графита по размерным группам. Наблюдаются две противоположные тенденции: а) при большой степени деформации (80%) отмечается незначительный рост включений графита, принадлежащих к размерной группе более 60 мкм, который можно связать с объединением нескольких мелких включений в одно крупное; б) число мелких включений (0–20 мкм) в поперечном сечении существенно возрастает, что связано со значительной степенью деформации (вытягивание). Если в исходном состоянии данных включений было около 58%, то при степени деформации 80% их число увеличивается до 86%.

Таким образом, учитывая дисперсность включений графита, анизотропию свойств материала в целом, предоставляется возможность целенаправленного прогнозирования уровня технических характеристик изделий при проектировании и создании новых образцов техники.

## Литература

1. William D. Callister, David G. Rethwisch. Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach. Technology & Engineering. 2012. P. 910.
2. Покровский А. И., Ласковнев А. П., Дудецкая Л. Р. и др. // Актуальные проблемы прочности: Сб. трудов междунар. конф. под ред. М. М. Кристалла. Россия, г. Тольятти. 2009. Тольяттинский государственный университет. 2009. С. 87, 88.
3. Покровский А. И., Хроль И. Н. // Перспективные материалы и технологии: Сб. матер. Витебск. госуд. технол. ун-та: Научное издание. Витебск, 2008. С. 241–245.
4. Дудецкая Л. Р., Данильчик И. К., Покровский А. И., Хроль И. Н. // Литье и металлургия. 2010. № 1. С. 30–36.
5. Мальцева М. А., Гервасьев М. А., Кутьин А. Б. Материаловедение: Учебное пособие. Екатеринбург, 2007.
6. Солнцев Ю. П., Пряхин Е. И. Материаловедение: Учеб. для вузов. Изд. 4-е, перераб. и доп. СПб, 2007.
7. Покровский А. И. Горячая пластическая деформация чугуна: структура, свойства, технологические основы. Мн., 2010.
8. Покровский А. И. Структурообразование чугуна при горячей пластической деформации (научные и технологические основы получения изделий из чугуна с использованием горячего выдавливания и штамповки): Научное издание. «LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co». Saarbrücken, Germany, 2012.
9. Ржевская С. В. Материаловедение / Учеб. для вузов: 4-е изд., перераб. и доп. М., 2004.
10. Покровский А. И. // Перспективные материалы и технологии (глава 27): Науч. изд. под ред. В. В. Клубовича. Витебск, 2013. С. 566–586.
11. Чаус А. С., Сойка Я., Покровский А. И. // Физика металлов и материаловедение. М., 2013, Т. 114, № 1. С.94–104.

I. N. KHROL

## INFLUENCE OF HOT PLASTIC DEFORMATION ON MORPHOLOGY OF GRAPHITE AND METALLIC MATRIX OF HIGH-DUTY CAST IRON

### Summary

The results of studies showing the effects of hot plastic deformation on the processes of forming graphite inclusions and hardening of metal matrix are presented. Found that with increasing degree of hot plastic deformation, not only the shape of graphite inclusions changes, but their redistribution in the plane of the section changes also, which affects the anisotropy properties of nodular iron. Based on these results a conclusion is made that with the help of hot plastic deformation it is possible to obtain the specified strength characteristics of ductile iron.