

І СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ. ОПІР РУЙНУВАННЮ ТА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

УДК 669.112

Канд. техн. наук Н. И. Урбанович¹, канд. техн. наук А. И. Покровский²,
канд. техн. наук В. С. Нисс¹, канд. техн. наук К. Э. Барановский¹, Е. В. Розенберг¹

¹ Белорусский национальный технический университет, ² Физико-технический институт НАН Беларуси;
г. Минск

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА, ПОЛУЧЕННОГО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДЕФОРМАЦИОННЫХ И ТЕРМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Приведены результаты исследований структуры и свойств высокопрочного чугуна в литом состоянии, после горячей пластической деформации и последующей его термической обработки. Установлено, что оптимальное сочетание прочностных и пластических свойств чугуна после деформации позволила обеспечить изотермическая закалка σ_s до 1230 МПа и δ – до 6,2 %.

Ключевые слова: высокопрочный чугун, шаровидный графит, термообработка, изотермическая закалка, структура, свойства.

Известно, что все чугуны характеризуются пониженной пластичностью. Это объясняется наличием в металлической матрице хрупких и мало пластичных фаз: цементита и/или графита. Цементит, в частности, имеет высокую твердость (более 800 НВ) и практически нулевую пластичность. Графит характеризуется пониженной пластичностью и высокой хрупкостью, что обусловлено слоистым строением его кристаллической решетки [1–2]. В нормативных документах (ГОСТ 1412-85, ГОСТ 27208-87, ГОСТ 7293-85) основными регламентируемыми показателями механических свойств чугунов являются временное сопротивление разрыву (σ_s) и относительное удлинение (δ). В связи с вышесказанным, повышение механических характеристик, особенно пластичности, является актуальной задачей. Решение данной задачи традиционными путями, например, легированием, модифицированием, термообработкой почти исчерпали свой ресурс. Существенно улучшить качество чугуна и комплекс физико-механических характеристик помимо придания изделию требуемой формы позволяет горячая пластическая деформация литых заготовок [3–4]. Литейно-деформационная технология изготовления изделий из чугуна требует знания основных аспектов деформационного воздействия на структуру и свойства высокоуглеродистых сплавов железа.

Целью данной работы являлось исследование структуры и свойств высокопрочного чугуна (ВЧ) в литом состоянии, после горячей пластической деформации и последующей его термической обработки.

Исследования выполняли на сканирующем электронном микроскопе VEGA-2 LMU с микроанализатором

INKA Energy 350, сканирующем зондовом микроскопе «С3М Solver PROM», а также металлографическом микроскопе «Альтами». Механические свойства определяли по стандартным методикам. Твердость по Бринеллю – по ГОСТ 9012-59. Испытания на растяжение проводили по ГОСТ 1497-84, на ударную вязкость – по ГОСТ 9454-78. Изготовление и травление шлифов проводилось по стандартным методикам, в качестве травителя использовали 5 % раствор азотной кислоты в этиловом спирту (ниталь).

В качестве базового материала для исследований был использован чугун марки ВЧ 50, имеющий ферритно-перлитную металлическую основу, в которой шаровидные графитные включения находятся в ферритной оболочке.

Авторами [1] предложена модель строения шаровидного графита (рис. 1, а), согласно которой графитный сферокристалл состоит из кристаллитов пирамидальной формы, сходящихся своими вершинами в центре включения. Плоскость, параллельная основанию каждой пирамиды, является базисной. Подтверждением выше предложенной модели является изображение шаровидного графита, полученное на спектральном электронном микроскопе и представленное на рисунке 1, б. Сферокристалл характеризуется наличием субзеренной структуры, состоящей из многочисленных секторов, которые, по-видимому, являются кристаллитами пирамидальной формы. В свою очередь, в сечении кристаллита наблюдается чередование параллельных слоев, являющихся базисными плоскостями кристаллита и располагающихся перпендикулярно

радиусу-вектору. В центре сечения графита находится темно-серое пятно (в других сечениях графита пятно может иметь и светло-серый цвет), являющееся базисной плоскостью кристаллита, располагающегося нормально к плоскости шлифа, соответственно, разрез такого кристаллита должен находиться в центре исследуемого сечения сферокристалла. Следует отметить, что пятна могут иметь трех-, четырех-, пяти- и шестигранную форму, что позволяет судить о форме и размерах кристаллитов, образующих сферокристалл. В сечении сферокристалла также наблюдаются белые включения, располагающиеся в радиальном направлении по границам сегментов. Микрорентгеноспектральный анализ показал, что белые включения, предположительно, соответствуют ферритной фазе, так как наличие углерода в них незначительное, а содержатся преимущественно: железо, марганец, кремний.

Спектральный анализ химического состава по сечению графитного включения (рис. 2) позволил установить, что базисная плоскость кристаллита обогащена магнием, серой, кислородом, железом, а концентраци-

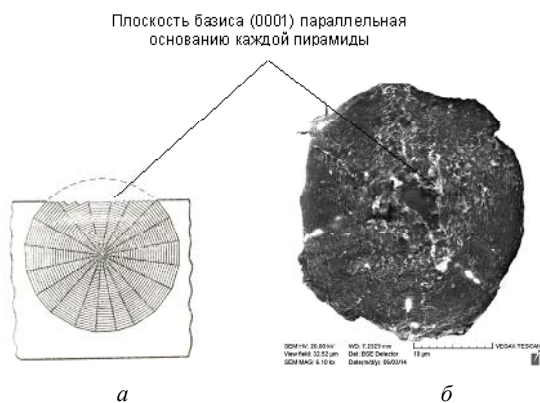


Рис. 1.

онный пик углерода в центре включения графита, напротив, снизился. Полученные результаты свидетельствуют о том, что на базисных поверхностях растущего сферокристалла графита адсорбируются примеси в виде оксисульфидов и сульфидов магния, железа и, таким образом, образуют адсорбционную пленку. Отсюда следует, что слоистая структура пирамидальных кристаллитов не однородна по химическому составу и не состоит только из графита. Предполагается, что идет чередование слоев графита и адсорбционной пленки, состоящей из оксисульфидов магния и железа.

Таким образом, можно предположить, что гипотеза кристаллизации шаровидного графита по адсорбционному механизму получила свое дальнейшее развитие в представленных результатах исследований.

Для исследования влияния деформации на структуру и свойства высокопрочного чугуна литые цилиндрические образцы испытывали на прессе горячей пластической деформации методом выдавливания в условиях неравномерного всестороннего сжатия. Температура деформации составляла при этом 850 °С–

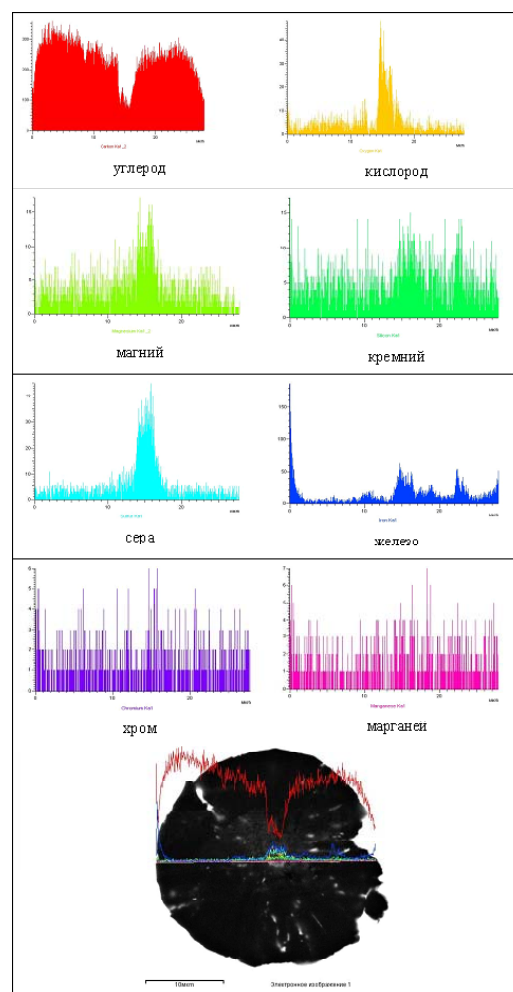


Рис. 2.

1000 °С. Из рисунка 3, на котором представлена микроструктура ВЧ, прошедшего деформационное воздействие с разной степенью деформации, видно, что форма графита видоизменяется особенно в продольном направлении вытяжки.

Графитные включения вытягиваются вдоль течения металла, приобретая своеобразную морфологию, которая изменяется по мере изменения степени деформации от овальной (рис. 3, а) до веретенообразной и нитевидной (рис. 3, б). Следует отметить, что ферритная оболочка вытягивается вслед за графитным включением (рис. 3, в), перлит после деформирования становится более мелкодисперсным, а сами зерна измельчаются.

Анализ микроструктур поперечного сечения образцов ВЧ, полученных при разных степенях деформации, показал, что с увеличением степени деформации количество графитных включений на единицу площади возрастает (рис. 4). Увеличение числа включений, вероятно, связано с делением графита на части и с зарождением дополнительных центров графитизации вследствие роста количества точечных и линейных дефектов решетки при нагреве под деформацию и в процессе самой деформации.

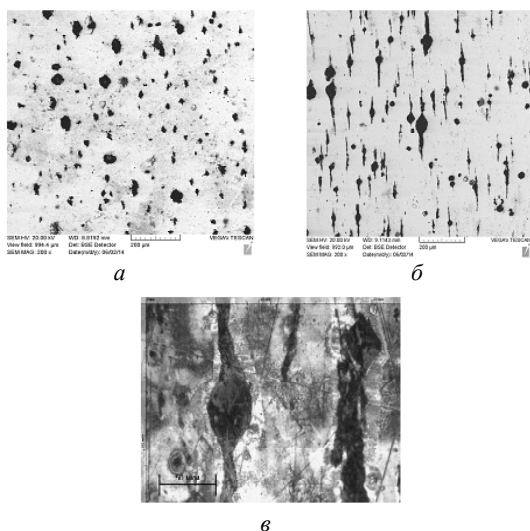


Рис. 3.

Одним из перспективных путей улучшения свойств чугунов является горячее пластическое деформирование в сочетании с эффективными методами термической обработки. Из многочисленных видов термической обработки чугунного литья наибольшее применение получили: нормализация, закалка, закалка + отпуск, а также изотермическая закалка на бейнит [5]. В данной работе исследовали влияние вышеуказанных видов термообработки на структуру и свойства литого и деформированного ВЧ.

С целью получения корректных сравнительных результатов по механическим свойствам чугунов до и после их деформирования литые образцы нагревали до температур, соответствующих температурному интервалу деформирования (850 °С–1000 °С), и охлаждали на воздухе, как и деформированные. Нагрев литых образцов осуществляли в индукционной установке, так как индукционный нагрев использовался для нагрева заготовок перед деформированием. Следует отметить, что нагрев литых образцов из ВЧ до указанных температур с последующим охлаждением на воздухе повысил прочностные и снизил пластические свойства чугуна.

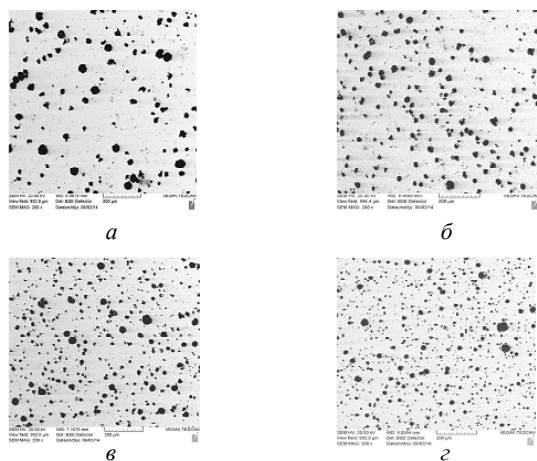
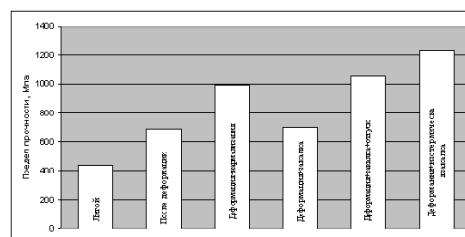


Рис. 4.

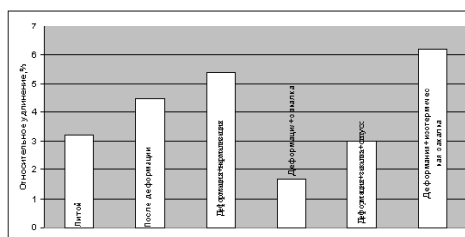
Режим нормализации и закалки деформированных образцов заключался в нагреве в печи до 950 °С с выдержкой 1 час и в последующем охлаждении их на воздухе и воде соответственно. Отпуск проводили при 200 °С в течение 2 часов. Изотермическую закалку ВЧ, подвергнутого деформированию при температуре 850 °С–1000 °С, осуществляли путем погружения его в емкость с расплавленным свинцом, имеющим температуру 350 °С, сразу после деформирования, при этом изотермическая выдержка составляла 2 часа.

Механические свойства высокопрочного чугуна в литом и деформированном состоянии после различных видов термообработки представлены гистограммами на рисунке 5.

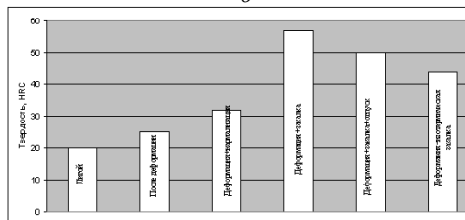
Полученные результаты показали, что нормализация ВЧ после его деформирования обеспечивает повышение прочности с 690 МПа до 990 МПа, относительного удлинения с 4,5 % до 5,4 % и твердости с 25 HRC до 32 HRC. Закалка деформированного чугуна, по сравнению с деформированным чугуном без термообработки, незначительно увеличила прочность, но при этом резко увеличила твердость до 57 HRC и снизила пластичность с 4,5% до 1,7 %, что связано с получением структуры мартенсита и повышением внутренних напряжений. Последующий низкий отпуск деформированного чугуна позволил повысить прочность до 1050 МПа, относительное удлинение – до 3 %, а твердость снизить до 50 HRC. Следует отметить, что из всех представленных выше видов термообработки только изотермическая закалка позволила обеспечить оптимальное сочетание прочностных и пластических



а



б



в

Рис. 5.

Таблица 1 – Механические свойства высокопрочного чугуна с разной степенью деформации после изотермической заковки

Степень деформации, %	Время выдержки, ч	Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %
20	2	1150	770	5,4
60	2	1230	980	6,2

свойств ВЧ: σ_s до 1200 – 1230 МПа, δ до 5,9–6,2 %.

На рисунке 6 представлена структура ВЧ после изотермической заковки, которая характеризуется наличием бейнита и остаточного аустенита (светлая фаза).

Следует отметить, что с повышением степени деформации ВЧ количество остаточного аустенита возрастает. Отмечено также, что на рост прочности и пластичности ВЧ, подвергнутого изотермической заковке, оказывает влияние и степень деформации

Результаты исследований, представленные в таблице 1, показали, что с повышением степени деформации в указанных пределах прочность и пластичность повышаются.

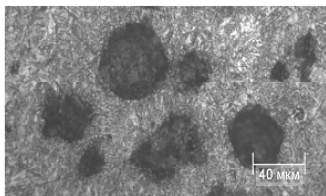


Рис. 6.

Заключение

1. Показано, что графит шаровидной формы характеризуется наличием субзеренной структуры, неоднородной по фазовому составу, структурному и элементному составу и состоящей, в свою очередь, из большого количества отходящих от центра сегментов.

2. Установлено, что слоистая структура сегмента (пирамидального кристаллита) шаровидного графита не однородна по химическому составу и не состоит только из чистого графита, а имеет в своем составе другие химические элементы в виде оксисульфидов магния, железа, адсорбированных на поверхности графита. Предполагается, что идет чередование слоев графита и адсорбционной пленки, состоящей из

оксисульфидов магния и железа.

3. Показано, что после деформирования высокопрочного чугуна графит вытягивается вдоль течения металла, приобретая веретенообразную и нитеобразную форму, ферритная оторочка вытягивается вслед за графитным включением. Перлит после деформирования становится более мелкодисперсным, а сами зерна измельчаются.

4. Установлено, что с повышением степени деформации высокопрочного чугуна количество графитных включений на единицу площади увеличивается.

5. Показано, что из широко применяемых видов термической обработки (заковка, заковка + отпуск, нормализация, изотермическая заковка), которым подвергали деформированный ВЧ, оптимальное сочетание прочностных и пластических свойств позволила обеспечить изотермическая заковка σ_s до 1230 МПа и δ до 6,2 %. Причем с повышением деформации прочность и пластичность ВЧ, подвергнутого изотермической заковке, повышаются.

Список литературы

1. Бунин К. П. Основы металлографии чугуна / Бунин К. П., Малиночка Я. Н. Таран Ю. Н. – М. : Металлургия, 1969. – 416 с.
2. Чугун : справ. изд. / Под ред. А. Д. Шермана и А. А. Жукова. – М. : Металлургия, 1991. – 576 с.
3. Покровский А. И. Горячая пластическая деформация чугуна: структура, свойства, технологические основы. Научное издание / Покровский А. И. – Минск : Изд. «Беларуская навука», 2010. – 256 с.
4. Покровский А. И. Структурообразования чугуна при горячей пластической деформации (научные и технологические основы получения изделий из чугуна с использованием горячего выдавливания и штамповки) / Покровский А. И. – Изд. «LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co». Saarbrücken, Germany. – 2012. – 344 с.
5. Бобро Ю. Г. Изотермическая заковка чугуна / Бобро Ю. Г., Пивоваров В. М. – Харьков : Прапор, 1968. – 112 с.

Поступила в редакцию 10.11.2015

Урбанович Н.І., Покровський А.І., Нісс В.С., Барановський К.Е., Розенберг Є.В. Структура і властивості високоміцного чавуну, отриманого з використанням деформаційних і термічних дій

Наведено результати досліджень структури і властивостей високоміцного чавуну в литому стані, після гарячої пластичної деформації і подальшої його термічної обробки. Встановлено, що оптимальне поєднання міцності і пластичних властивостей чавуну після деформації дозволила забезпечити изотермічне загартування σ_s до 1230 МПа і δ – до 6,2 %

Ключові слова: високоміцний чавун, кулястий графіт, термообробка, изотермічне загартування, структура, властивості.

Urbanowich N., Pokrovskii V., Niss V., Baranovskii K., Rosenberg E. Structure and properties of the высокопрочного cast-iron got with the use of deformation and thermal influences

The results of the structure and properties investigations for high-strength cast iron in as-cast condition after hot plastic deformation and subsequent heat treatment are presented in. It was found that austempering after deformation makes possible optimum combination of strength and ductility (σ_s up to 1230 МПа, δ up to 6,2 %).

Key words: high-strength cast iron, spheroidal graphite, heat treatment, austempering, structure, properties.