



It is shown that the plastic deformation of cast irons with impurities of fragile phases of cement and graphite is an example of the general case of deformation of heterogeneous materials, in which fragile phase is located inside of the plastic base. It is confirmed that the most important factor is application of the deformation schemes close to uniform compression, what enables to deform plastically the fragile phases in the cast iron structure.

А. И. ПОКРОВСКИЙ, ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси»

УДК 669.136:621.73.011:539.374

ПЛАСТИЧЕСКОЕ ТЕЧЕНИЕ ВКЛЮЧЕНИЙ ЦЕМЕНТИТА И ГРАФИТА ПРИ ОБРАБОТКЕ ДАВЛЕНИЕМ ЧУГУНА

Структурные факторы, определяющие способность чугунов подвергаться пластической деформации. Общепринятая классификация железоуглеродистых сплавов на стали и чугуны, сложившаяся уже более 100 лет назад, основывается на количественном содержании углерода в сплаве. Согласно этой классификации, к чугунам относятся сплавы железа, содержащие более 2,14% углерода [1]. Кроме того, она подразумевает, что пластической деформации способны подвергаться только сплавы, содержащие менее 2,14% углерода, так как при более высоких его содержаниях в соответствии с диаграммой состояния «железо-углерод» в пластичной, мягкой (160 – 200 НВ) основе – аустените выделяются хрупкие и малопластичные фазы: цементит или (и) графит [2].

Цементит, в частности, имеет высокую твердость (более 800 НВ, или 900–1000 НВ) и чрезвычайно низкую, практически нулевую пластичность, поэтому при приложении нагрузки трещины распространяются вдоль пластинок цементита [3]. Графитные включения также имеют низкую прочность и высокую хрупкость. Среди литейщиков существует даже мнение, которое трактует включения графита по воздействию на общую прочность чугуна как пустоты, внутренние «надрезы», которые ослабляют металлическую матрицу, являются концентраторами напряжений, местами зарождения и распространения микротрещин [4]. Вместе с тем, роль графитных включений в структуре чугуна для обеспечения хороших эксплуатационных и технологических свойств машиностроительных деталей трудно переоценить. Именно включения графита обеспечивают хорошие антифрикционные свойства, способность быстро гасить вибрации и резонансные колебания, малую чувствительность к надрезам, меньший, чем у стали, удельный вес, повышенную теплопроводность

от зон местного нагрева, облегчают обрабатываемость, делая стружку ломкой [5].

Таким образом, наличие в структуре чугуна фаз с низкой прочностью и высокой хрупкостью (цементита и графита) не позволяет реализовать достаточно высокий потенциал пластичности металлической основы – аустенита. Поэтому сложившееся у литейщиков вполне определенное (причем невысокое) мнение о пластичности чугуна и его способности подвергаться пластической деформации в некоторой мере обосновано.

Следует отметить, что значение углерода 2,14% (при 1147 °С), которое важно в определении границы между пластичным и непластичным материалом, является теоретическим и в некоторой степени формальным. Практика показывает, что эта величина может сдвигаться в большую или меньшую сторону, на ее расположение влияют примеси (кремний марганец, сера, фосфор) и легирующие элементы. Степень переохлаждения также оказывает влияние на положение граничной точки, так как образование графита из жидкости или аустенита – медленный процесс, требующий диффузии углерода для образования кристаллов графита и отвода атомов железа от фронта кристаллизации графита. Поэтому более поздние учебные и справочные издания [6, 7] делают основной упор не на так называемую «химическую» классификацию (по количеству углерода), а на «структурную», связанную с наличием в структуре железоуглеродистых сплавов эвтектики – ледебурита.

Несмотря на сложившийся стереотип, необходимо отметить, что классики материаловедения никогда не высказывались категорично о недеформируемости чугуна. Например, К. П. Бунин, Я. Н. Малиночка, Ю. Н. Таран в известной монографии посвятили даже небольшой раздел [8, с. 390–398] описаниям структурных изменений при деформации чу-

гуна. А. П. Гуляев, еще в 5-м издании известного учебника достаточно осторожно пишет о недеформируемости чугуна. Дословно говорится о чугуне не как о вообще недеформируемом, а как о материале с «малой способностью к горячей пластической деформации (в обычных условиях не поддается ковке)» [9, с. 203]. Ключевой здесь, по нашему мнению, является фраза: «в обычных условиях»; а об условиях, являющихся оптимальными для пластической деформации чугуна, мы еще скажем ниже. Белорусские ученые, в частности Д. Н. Худокормов [6, с. 8], также придерживаются мнения только о невозможности «подвергать чугун холодной обработке давлением».

Пластическая деформация белого (не содержащего графит) чугуна. Длительное время считалось, что наибольшее отрицательное влияние на пластичность чугуна оказывает наличие в структуре главным образом графитных, а не цементитных включений. В свое время на этапе опробования способов горячей обработки давлением применительно к чугунам доминировала точка зрения: «пусть заготовкой лучше будет полностью «белый» чугун и если в нем полностью отсутствуют графитные включения, мы его успешно продеформируем». Такой материал по структуре напоминал стали карбидного класса, а отсутствие в его структуре хрупкой графитной составляющей снимало предубеждение у исследователей о его недеформируемости. Разумеется, белый чугун по сравнению со сталями тоже обладал пониженной пластичностью, но основной проблемой были высокие показатели сопротивления деформации, что требовало использования мощного оборудования.

Пониженная пластичность белого чугуна обусловлена наличием в его структуре аустенитно-цементитной эвтектики – ледебурита, пластичная фаза которой – аустенит расположена в малопластичном карбиде железа; в доэвтектическом чугуне ледебурит кристаллизуется в междендритных участках первичного аустенита. Исследованиям возможности обработки давлением белого чугуна, не содержащего графита, посвящено много публикаций. К первым работам этого направления относится статья С. А. Баранова (1931г.) [10], которая является пионерской вообще по деформированию чугунов. Позднее исследования материаловедческих особенностей обработки давлением белого чугуна проводились достаточно интенсивно, о чем свидетельствует большое число статей, например [11–17], и ряд диссертационных работ [18–20].

Строение графита и графитных включений и возможность их пластической деформации. Согласно сложившемуся в настоящее время мне-

нию, именно графитные включения являются основным структурным фактором, влияющим на невысокие значения пластичности чугуна; это определяется строением кристаллической решетки графита (рис. 1).

Как видно из рис. 1, в базисных (наиболее плотно упакованных) плоскостях атомы располагаются в углах правильных шестиугольников. Параметр a – расстояние между атомами составляет 0,1415 нм [8]. Ковалентные связи осуществляются спариванием трех валентных электронов каждого атома с электронами трех окружающих его соседей. При этом четвертые валентные электроны коллективизируются, что придает графиту металлическую, высокую электропроводность, непрозрачность и блеск.

Параметр c – расстояние между слоями для природного (цейлонского) графита при нормальных условиях (при комнатной температуре) составляет 0,33544 нм. Между слоями действуют слабые поляризационные силы Ван-дер-Ваальса. Энергия связи между слоями гексагонального графита составляет 16,75 Дж/моль (при 15 °С), 15,1 Дж/моль (при температуре минус 134,15 °С). Энергия связи между атомами углерода в слое на порядок больше – 167,6 Дж/моль (1118 °С) [21]. Существенная разница в энергиях связи обеспечивает легкую подвижность слабо связанных между собой слоев.

Каждый слой кристалла графита можно рассматривать как плоскую макромолекулу, поляризованную под действием соседних макромолекул. Взаимодействие между слоями осуществляется ван-дер-ваальсовыми силами. В результате взаимного притяжения диполей слои графита сближаются до тех пор, пока силы Ван-дер-Ваальса не уравновешиваются отталкиванием, обусловленным перекрытием электронных оболочек макромолекул. Внутри слоя связи между атомами ковалентные, образованы sp^2 -гибридными орбиталями.

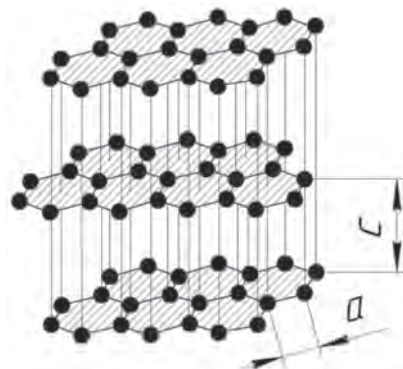


Рис. 1. Кристаллическая решетка графита с гексагональной (наиболее распространенной) структурой

В кристаллической решетке графита могут наблюдаться искривления углеродных сеток и дефекты тонкого строения. В результате коагуляции вакансий могут образоваться микрополости диаметром до 3 мкм. Объединение отдельных участков этих дефектов приводит к возникновению краевых дислокаций, а также дислокационных петель величиной 0,1–1,0 мкм. Концентрация вакансий в графите увеличивается при его нагревании, например, при 3650 °С она достигает 0,5 атом.%. Дефекты могут возникать и при внедрении в кристаллическую решетку как углеродных атомов, так и гетероатомов [21].

В зависимости от относительного размещения слоев различают графит с гексагональной и ромбической структурой. При гексагональной структуре (рис. 1) атомы углерода в каждом слое расположены против центров шестиугольников соседнего слоя и только следующий слой повторяет первое расположение атомов, т. е. слои чередуются по схеме АБ–АБ–АБ. Рядом исследований [22, 23] показано, что у естественного графита и графита, выделяющегося в чугунах, одинаковая слоистая упаковка атомов.

При другой, ромбической, структуре повторяемость упаковки атомов в слоях происходит не через один слой, а через два слоя по схеме АБВ–АБВ–АБВ [8]. Следует отметить, что доля гексагональной и ромбической упаковки в кристаллах графита может меняться смещением слоев в результате различных воздействий. Например, доказано [24], что при размоле графита увеличивается доля ромбической упаковки. Предполагается, что механизм этого перехода аналогичен двойникованию. Гексагональная структура (АБ–АБ–АБ) считается более устойчивой, чем ромбическая, и, например, нагрев до 2200–2700 °С способствует переходу графита в состояние с гексагональной упаковкой.

Имеется ряд публикаций по исследованиям прочностных и пластических показателей графита, но они касаются в основном природного и искусственно синтезированного графита [25], что обусловлено потребностями в этом материале атомной, ракетной промышленности, химического машиностроения.

Косвенно, с определенными допущениями, о прочности графитных включений можно судить по характеристикам близкого им по природе природного цейлонского кристаллического графита, некоторые данные о котором [21, 26] приведены в таблице.

Как видно из таблицы, природный графит имеет низкую прочность, твердость и пластичность.

Интегрированные показатели пластичности чугунов с различной формой графита (учитывающие

Некоторые механические характеристики кристаллического (природного цейлонского) графита [21, 26]

Показатель	Значения
Предел прочности при растяжении, МПа	9,8–14,7
Предел прочности при изгибе, МПа	19,6–21,6
Предел прочности при сжатии, МПа	24,5–29,4
Коэффициент Пуассона	0,20–0,27
Твердость по Бринеллю, МПа	392–588
Твердость по шкале Мооса	1–2

совместное влияние металлической матрицы и графитных включений) хорошо исследованы [9] и четко зависят от формы включений. Доказано, что по мере приближения формы графита к сферической пластичность существенно растет. Величины относительного удлинения при испытаниях на растяжение чугунов (с одинаковым типом металлической матрицы) следующие: с пластинчатым графитом – 0,2–0,5%; вермикулярным – 1,0–1,5; хлопьевидным – 5–10; шаровидным графитом – 10–15%.

Что касается механических характеристик собственно графитных включений (являющихся составной частью структуры чугуна), то нам не удалось обнаружить публикаций об исследованиях такого рода. Это связано, вероятно, во-первых, с микроскопическими размерами графитных включений (их величина порядка 10 – 100 мкм) и трудностями их вычленения из металлической матрицы, во-вторых, со сложностью проведения таких экспериментов.

Соображения о влиянии схемы деформации на пластичность хрупких в обычных условиях сред. Как известно, пластическая деформация представляет собой сложный процесс, причем на величину предельной деформации (которую можно достичь без разрушения) оказывают влияние многие факторы [27], в частности, структура, механические характеристики металла, температурно-скоростные условия деформирования. Наибольшее же влияние на значение предельной деформации оказывают схемы напряженного состояния, а они существенно отличаются в различных процессах обработки давлением.

Показано [28], что наибольшая предельная деформация достигается при отсутствии растягивающих напряжений и увеличении сжимающих. Собственно результаты работ П. В. Бриджмена по исследованию пластичности хрупких веществ в условиях сжатия [29] и послужили одним из оснований для присуждения ему Нобелевской премии по физике за 1946 год. В частности, было теоретически рассчитано и экспериментально установлено, что в условиях неравномерного всесто-

ронного сжатия даже хрупкие материалы типа мрамора могут получать пластические деформации [30]. Такие опыты успешно провели Т. Карман, Р. Беккер и П. В. Бриджмен (1947 г.) и теперь они являются классикой обработки материалов давлением. Например, производили эксперименты на сжатие с каррарским мрамором и песчаником. Известно, что при обычных условиях испытания эти минералы хрупкие, обладая низким сопротивлением отрыву, они разрушаются, не успев проявить пластических свойств. Но если испытание образцов из мрамора производили в условиях неравномерного всестороннего сжатия (> 80 МПа), например в жидкости, находящейся под высоким давлением, они обнаруживали пластические свойства.

Описаны также результаты испытаний растяжением фарфоровых стерженьков при значительном всестороннем сжатии, причем эти стерженьки вели себя как пластичные элементы, образовывалась «шейка», а характер разрушения был чисто пластическим [28]. В науках о горных породах (петрографии и минералогии) известно, что породы, хрупкие в обычных условиях, находясь в недрах земли под огромным давлением, медленно текут, получая при этом весьма большие деформации. Позднее было показано [31], что такое поведение характерно для хрупких материалов различной природы: углеродистых и легированных сталей, серого чугуна, бетонов, полимеров.

Что касается чугуна и его хрупких составляющих (цементита и графита), то первые фотографии пластического течения пластинок цементита белого чугуна представлены в работе И. Н. Богачева [32] (рис. 2, а). Очевидно, что в данном случае металлическая матрица чугуна (аустенит) являлась средой, обеспечивающей всестороннее сжатие включения. В качестве аналогии на рис. 2, б приведено художественное видение процесса пласти-

ческого течения на фрагменте картины Сальвадора Дали.

Позднее было доказано [33], что формоизменение шаровидного графита в чугуне может происходить и в условиях, не полностью соответствующих неравномерному всестороннему сжатию. На рис. 3 представлены изменения микроструктуры чугуна как в горячем состоянии после выдавливания (рис. 3, а) и поперечной трехвалковой прокатки (рис. 3, б), так и при комнатной температуре, например, после поверхностной обкатки роликами [34] (рис. 3, в). В этих случаях схема неравномерного всестороннего сжатия, вероятно, реализуется в микрообъеме металла за счет его обжатия, с одной стороны, деформирующим инструментом (матрицей, валком), с другой – соседними слоями металла. При этом в структуре наблюдается достаточно четкая граница между зонами интенсивной и менее интенсивной деформации.

Исследования пластической деформации чугунов, содержащих в структуре графит. После убедительных опытов Т. Кармана, Р. Беккера и П. В. Бриджмена во многих странах практически одновременно были предприняты попытки пластической деформации чугунов, содержащих в структуре свободный графит различной формы (серого, ковкого, высокопрочного). Первые публикации по этой тематике появились в 40-х годах XX столетия. Приблизительная хронология исследований и перечень опробованных методов обработки давлением:

1949 г. – прокатка (Е. Piwowarski, А. Wittmoser, [35]);

1951 г. – ковка и прокатка (J. Perry, J. Rehder, [36]);

1953 г. – ковка, штамповка, прокатка (Е. П. Унков, Д. И. Бережковский [37]);

1955 г. – выдавливание, прокатка (В. Sigg [38]).



а



б

Рис. 2. Фотография, иллюстрирующая пластическое течение цементита [32] (а), художественная аналогия пластического течения хрупких сред (б) (фрагмент картины Сальвадора Дали «Постоянство памяти»)

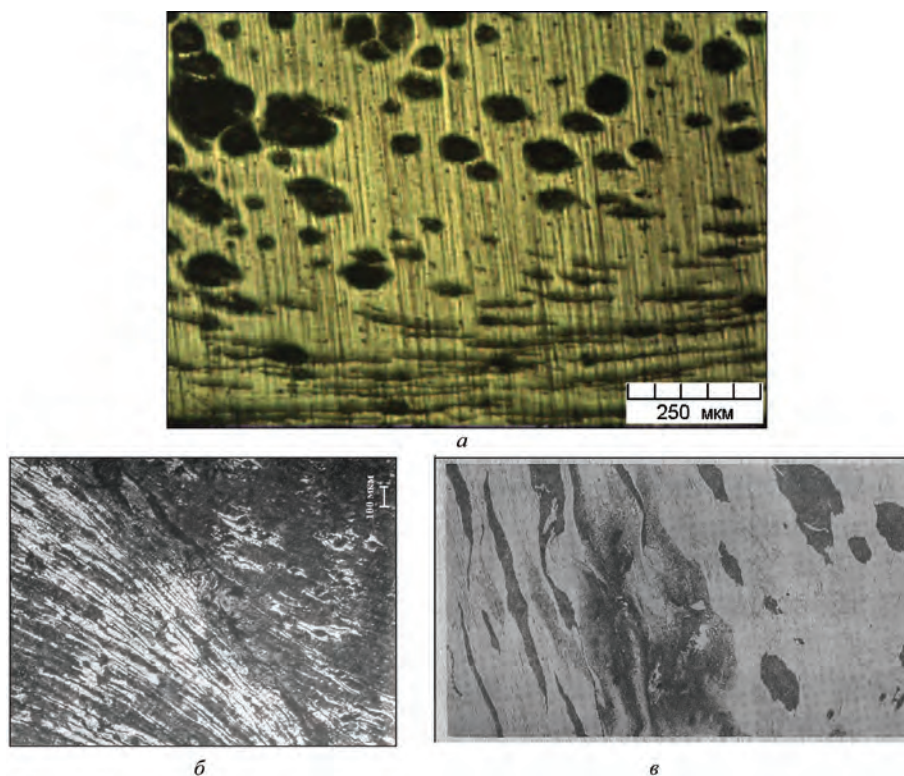


Рис. 3. Микроструктура поверхностных слоев деталей типа прутков и валов из высокопрочного чугуна, подвергшихся интенсивной деформации: *a* – после горячего выдавливания через матрицу (фото автора); *б* – после горячей поперечной трехвалковой прокатки [33]; *в* – после холодной обкатки роликами [34]

Выполненные работы быстро развеяли предубеждение ученых и практиков о невозможности подвергать пластической деформации чугун, в структуре которого содержатся графитные включения. Было доказано, что, несмотря на то что при комнатной температуре чугун является малопластичным материалом, в горячем состоянии его можно успешно подвергать пластической деформации, причем в той или иной мере применимы практически все схемы формообразования.

Полностью подтвердилась теория [29, 30], что для чугуна, как и для многих других малопластичных материалов, наиболее благоприятной является схема неравномерного трехосного сжатия с минимальными растягивающими напряжениями. Было показано, что на практике данная схема наиболее эффективно реализуется в технологических процессах выдавливания, прессования и объемной штамповки [39]. Установлены особенности горячей обработки чугуна, заключающиеся в узком температурном интервале деформирования, небольших предельных степенях деформации, необходимости подогрева оснастки и использовании противодавления [40–43].

Анализ деформируемости чугунов с различной формой графита показал, что при прочих равных условиях наилучшей пластичностью обладает чу-

гун с шаровидным графитом. Незначительно уступает ему чугун с хлопьевидным графитом и гораздо хуже деформируется чугун с пластинчатой формой графита [44]. Достаточно подробный обзор способов горячей пластической деформации чугуна приведен в монографиях [44, 45].

Практическое подтверждение пластичности включений графита и цементита в чугуне при получении конкретных изделий. В качестве подтверждения описанных выше теоретических положений о деформации хрупких сред приведем несколько примеров успешной обработки давлением высокопрочного (рис. 4) и белого чугунов (рис. 5). Наиболее эффективным примером грамотного выбора схемы деформации, состава чугуна, параметров предварительной термической обработки является получение детали «корпус патрона электродреши» методом обратного выдавливания за один проход (рис. 4, *a*). Хотя степень деформации в зоне стенок детали достигала значений 85–90% (которые являются высокими даже для углеродистой стали), ресурс пластичности чугуна при данной схеме оказался достаточным, чтобы избежать нарушений целостности металла и получить высокое качество поверхности.

Не менее эффективным является пример обработки давлением белого чугуна (рис. 5, *a*), исходные

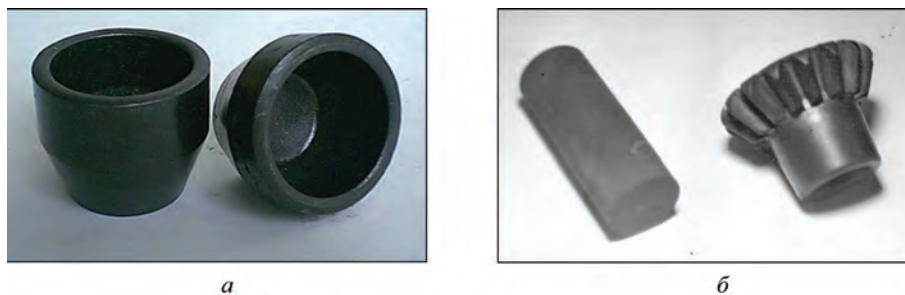


Рис. 4. Примеры грамотного выбора схемы и температурно-силовых условий пластического деформирования высокопрочного чугуна: *a* – получение детали «корпус патрона электродрели» для Оршанского инструментального завода (Беларусь) штамповкой из цельной цилиндрической заготовки за один удар [33]; *б* – получение в несколько переходов заготовки конической шестерни (с зубчатым венцом) гидравлического насоса для фирмы «Хидравлика» (Болгария) [42]

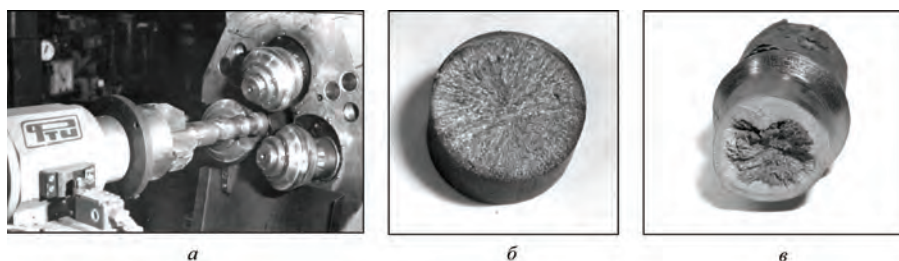


Рис. 5. Примеры грамотного выбора схемы и температурно-силовых условий пластического деформирования белого чугуна: *a* – получение деталей типа ступенчатых валов поперечной трехвалковой прокаткой; *б* – макроструктура излома исходной заготовки; *в* – макроструктура излома прокатанной заготовки. *б, в* – $\times 2$

прутки из которого получали непрерывным литьем. Пластичность этого материала в исходном состоянии практически равнялась нулю, а о его хрупкости свидетельствовал тот факт, что он ломался на части, если случайно уронить на пол такой пруток.

Как видно из рис. 5, *б*, у литого материала излом носит хрупкий характер с грубыми радиальными бороздками, которые обычно распространяются от первичной трещины (вероятно, в центре прутка) к периферии. Из рис. 5, *в* видно, что в поперечном изломе деформированного прутка образуются две четко различимые зоны. Очевидно, что в процессе прокатки происходила пластическая деформация поверхностных слоев с круговым сдвигом металла относительно не подвергавшейся деформированию центральной части прутка. В центре излома видны грубые радиальные бороздки, далее (ближе к периферии) – зона пластической деформации и, наконец, губа среза. Такой вид излома часто называют хрупко-вязким. Но следует отметить, что наличие «губы среза» характерно только для вязкого разрушения. Таким образом, в поверхностном слое в результате деформации произошло измельчение литой структуры. Ледебуритный каркас, придающий литому чугуну хрупкость и низкую прочность, в структуре чугуна полностью разрушился, эвтектические карбиды подверглись дроблению и деформации. Это и привело к повышению вязкости материала в указанной зоне и, как следствие, к изменению вида излома.

Выводы

Показано, что деформации чугунов с включениями хрупких фаз цементита и графита являются примером общего случая пластической деформации гетерогенных материалов, в которых хрупкая фаза расположена внутри пластичной основы. Подтверждено, что в этом случае наиболее важно использование схем деформирования, близких к всестороннему сжатию, что позволяет пластически деформировать хрупкие фазы в структуре чугуна. Показано, что на практике данная схема наиболее эффективно реализуется в технологических процессах выдавливания, прессования и объемной штамповки, которые позволяют достигать степени деформации до 80% и обеспечивать получение изделий достаточно сложной формы с малыми припусками. Причем использование деформации для придания изделию требуемой формы не является самоцелью, другой, вероятно более важной причиной использования деформации, является возможность существенно улучшить комплекс физико-механических характеристик чугуна [44, 45].

Несмотря на то что исследованиями структурных и фазовых превращений после деформации чугуна занимаются уже более 50 лет, вопрос о том, что именно происходит с графитным включением при деформировании и насколько меняется их морфология, остается открытым. Существуют различные точки зрения на формоизменение графита в чугуне при деформировании, например, есть мнения, что

вокруг включения образуются несплошность, пустота, некоторые считают, что графит в деформированном чугуна разрушается, превращаясь в порошок, некоторые предполагают, что графит, подвергшийся деформированию, кардинально меняет

свою структуру. Это требует дополнительных исследований морфологии графитных включений в деформированном чугуна с использованием комплекса методов оптической и растровой электронной микроскопии.

Литература

1. Иванов В. Н. Словарь-справочник по литейному производству. М.: Машиностроение, 1992.
2. Гуляев А. П. Металловедение: учеб. для вузов, 6-е изд. М.: Металлургия, 1986.
3. Богачев И. Н. Металлография чугуна. М.; Свердловск: Машгиз, 1952.
4. Справочник по чугунному литью / Под ред. Н. Г. Гиршовича. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд. 1978.
5. Высокопрочный чугун в автомобилестроении / М. П. Шебашинов, Ю. Е. Абраменко, Н. И. Бех. М.: Машиностроение, 1988.
6. Худокормов Д. Н. Производство отливок из чугуна: Учеб. пособ. для вузов. Минск: Выш. шк., 1987.
7. Чугун: Справ. изд. / Под ред. А. Д. Шермана, А. А. Жукова. М.: Металлургия, 1991.
8. Бунин К. П., Малиночка Я. Н., Таран Ю. Н. Основы металлографии чугуна. М.: Металлургия, 1969.
9. Гуляев А. П. Металловедение: Учеб. для вузов, 5-е перераб. изд. М.: Металлургия, 1978.
10. Баранов С. А. Ковка чугуна // Сооб. Всесоюз. ин-та металлов: М.; Л.: Гос. науч.-техн. изд-во, 1931. № 8. С. 22–25.
11. Погодин-Алексеев Г. И. Обработка давлением отливок белого чугуна // Вестн. машиностроения. 1951. № 4. С. 57–60.
12. Богачев И. Н., Ветрова Т. С. Влияние горячей деформации на поведение белого чугуна при ударном нагружении // Литейное производство. 1972. № 6. С. 28–29.
13. Богачев И. Н., Ветрова Т. С. Пластическая деформация белого чугуна // МиТОМ. 1973. № 4. С. 58–59.
14. Онuki Тэру, Накамура Каудзи и др. Характеристика белого чугуна и свойства прокатываемого материала // Tetsu to Hagane, J Iron and Steel Inst. Jap. 1977. Vol. 63. N 4. P. 349.
15. Агапова Л. И., Ветрова Т. С., Жуков А. А. Особенности структуры и свойств белого деформированного чугуна, легированного ванадием, ниобием и титаном // МиТОМ. 1982. № 5. С. 55–58.
16. Скобло Т. С., Воробьева Э. Л. Исследование пластичности чугуна для прокатных валков // Сортопрокатное производство. 1978. Вып. 6. С. 105–111.17.
17. Способ обработки белого чугуна: А. с. 1046302 СССР: МКИ³ C21D5/04 / Ю. Н. Таран, П. Ф. Нижниковская и др.; Днепрпропетр. металлург. ин-т. № 3390552/22–02; Заявл. 26.02.82; Опубл. 07.10.83, Бюл. № 37 // Открытия. Изобретения. 1983. № 37. С. 97.
18. Мигачев Б. А. Исследование структурообразования и механических свойств белого чугуна с целью создания технологии горячей обработки давлением: Дис. ... канд. техн. наук. Свердловск, 1971.
19. Ветрова Т. С. Влияние горячей пластической деформации на структуру и свойства белого чугуна: Дис. ... канд. техн. наук. Свердловск, 1973.
20. Агапова Л. И. Повышение прочностных и пластических свойств белого чугуна путем легирования ванадием, ниобием и деформации: Дис. ... канд. техн. наук. М., 1981.
21. <http://www.ngpedia.ru/id649449p1.html> Большая энциклопедия Нефти Газа. Раздел «Графит».
22. Matiyama E. // Nature. 1959. Vol. 183. P. 433.
23. Уббелодзе А. Р., Льюис Ф. А. Графит и его кристаллические соединения. М.: Мир, 1965.
24. Laves F., Baskin Y. Z. // Kristallographie. 1956. Bd. 107. S. 22.
25. Графит как высокотемпературный материал / Под ред. К. П. Власова. М.: Мир, 1964.
26. <http://www.nanoscopy.org/tutorial/graphite/graphite.html>.
27. www.exponenta.ru/soft/Mathemat/pinega/a12/a12.asp Exponenta.ru.
28. Работнов Ю. Н. Сопrotивление материалов. М.: Физматгиз, 1963.
29. Бриджмен П. В. Новейшие работы в области высоких давлений // Успехи физических наук. 1947. Т. 31. № 3. С. 346–402.
30. Бриджмен П. В. Исследование больших пластических деформаций и разрыва. М.: Изд-во иностранной лит., 1955.
31. Потапова Л. Б. Механика материалов при сложном напряженном состоянии. М.: Машиностроение-1, 2005.
32. Богачев И. Н., Сенкевич В. Ф. // Тр. Уральского индустр. ин-та им. С. М. Кирова. 1944. № 19.
33. Покровский А. И. Разработка и внедрение технологии изготовления высококачественных изделий из деформированного чугуна // Наука и инновации. 2005. № 4 (26). С. 54–65.
34. Кудрявцев И. В., Савина Н. М., Баранова Н. Б., Балабанов Н. А. Конструкционная прочность чугуна с шаровидным графитом. М.: Гос. науч.-техн. изд-во машиностроительной лит., 1957.
35. Piwoarski E., Wittmoseger A. Gewaltes Gusseisen (Прокатанный чугун). Verlag W. Girardet. Eisen, 1949.
36. Perry J., Rehder J. Nodular iron hot forged and rolled experimentally (Эксперименты по горячей ковке и прокатке чугуна) // Iron Age. 1951. Vol. 168/N 14/P. 229.
37. Унксов Е. П., Бережковский Д. И. Исследованиековки, штамповки и прокатки чугуна со сфероидальным графитом // Вестн. машиностроения. 1953. № 12. С. 29–35.
38. Sigg B. Uber das Verhalten der Graphit-Spharoliten beider plastischer Verformung des duktilen Gusseisens (О поведении графитных сферолитов при пластической деформации чугуна) // Schweiz. Arch. Wiss. und Techn. 1955. Bd. 21. N 5. S. 148–150.
39. Антониниш Ю. Т. Разработка технологии горячего гидродинамического выдавливания чугуна: Дис. ... канд. техн. наук. Минск, 1985.
40. Гветадзе Р. Г. Разработка и оптимизация составов высокопрочных деформируемых чугунов: Дис. ... д-ра техн. наук. Киев, 1990.

41. Антошин Ю. Т. Пластическая деформация чугуна. Минск: Наука и техника. 1991.
42. Покровский А. И. Структурообразование чугуна при горячей пластической деформации и разработка технологии получения высококачественных изделий: Дис. ... канд. техн. наук. Минск, 2003.
43. Баранов Д. А. Повышение качества чугуна путем механического и теплового воздействия: Дис. ... канд. техн. наук. Донецк, 2004.
44. Покровский А. И. Горячая пластическая деформация чугуна: структура, свойства, технологические основы. Минск: Беларуская навука. 2010.
45. Покровский А. И. Структурообразование чугуна при горячей пластической деформации (научные и технологические основы получения изделий из чугуна с использованием горячего выдавливания и штамповки) / Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.