УДК 669.15-194.546.821

Сафронов Н.Н., доктор технических наук, профессор, Набережночелнинский институт ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»;
Харисов Л.Р., кандидат технических наук, доцент, Набережночелнинский институт ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»;
Сафронов Г.Н., Набережночелнинский институт ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет».

КОМПАКТИРОВАНИЕ В ГРАФИТИЗИРОВАННЫХ ЧУГУНАХ БЕЗ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ЕГО ЖИДКОГО СОСТОЯНИЯ

Аннотация: Представлены альтернативные технологические процессы получения чугунов с компактными формами графитных включений. 1 технологический процесс базируется на синергетическом комплексе литейно-металлургических факторов, воздействующих на чугун в стадиях приготовления его расплава и кристаллизации в литейной форме. 2 ресурсосберегающий и безотходный технологический процесс базируется на использовании процесса самораспространяющегоя высокотемпературного синтеза.

Ключевые слова: графитизированный чугун; компактный графит; модифицирование

Чугуны являются самыми дешёвыми машиностроительными материалами, обладающими хорошими литейными свойствами, обрабатываемостью резанием, износостойкостью, высокой сопротивляемостью при знакопеременных нагрузках. Все это обусловливает широкое применение чугунов в качестве конструкционного материала. Основной проблемой чугунов, определяющей их потребительские качества, является морфология графитовых включений, которая значительно влияет на основные свойства чугуна, в первую очередь на прочность и пластичность, характеризующие чугун как конструкционный материал. Многие эксплуатационные свойства серого чугуна зависят от размеров и количества графитных включений. Очевидно, что сравнительно мелкие включения с завихренными пластинами при их равномерном распределении

обеспечивают более высокие эксплуатационные свойства чугуна. Крупные пластины графита с относительно прямыми заостренными кромками служат источниками образования трещин, приводя в конечном итоге к разрушению детали или изделия в целом. Во многих крупноразмерных включениях графита наблюдаются характерные внутренние трещины в виде продольных разрывов сплошности, вызванных ростовыми напряжениями. Значительный уровень ростовых напряжений служит также причиной сильно выраженного рыхлого пакетного строения холмиков роста. Негативное влияние графита на снижение показателей механических свойств уменьшается по мере увеличения его компактности.

Наименее прочными и пластичными из конструкционных чугунов являются серые, в структуре которых графит имеет пластинчатую форму. Тем не менее, ввиду простоты получения серых чугунов с минимальными энергозатрами (≈ 800 кВт*ч/т) они нашли применение для изготовления деталей неответственного назначения и работающих при отсутствии ударных нагрузок. К числу наиболее крупных потребителей чугунного литья следует отнести автомобиле- и тракторостроение. В конструкции автомобилей и тракторов масса литых деталей из серого чугуна, например, составляет 15-25% от общей массы. Преимущественное применение серого чугуна обусловлено тем фактом, что в нем сочетаются высокая износостойкость и противозадирные свойства при трении с ограниченной смазкой, демпфирующая способность. Основная номенклатура изделий - это блоки, головки и гильзы цилиндров, крышки коренных подшипников двигателей, тормозные диски и диски сцепления, тормозные барабаны и другие детали, для которых серый чугун является оптимально технологичным и экономичным конструкционным материалом.

С целью повышения механических свойств чугуна была разработана технология [1, с. 36], заключающаяся в нагреве и длительной выдержки белого чугуна, в результате которой в структуре металла образовывался графит компактной формы. Такой чугун из-за значительного повышения

прочностных и пластических свойств по сравнению с серым получил символическое название - ковкий. Термин «ковкий чугун» является условным и характеризует пластические, а не технологические свойства чугуна, так как изделия из него, как и из других чугунов получают литьём, а не ковкой. Процесс получения отливок из ковкого чугуна включает две операции:

- Получение фасонных отливок из белого чугуна;
- Графитизирующий отжиг полученных отливок с целью распада цементита белого чугуна и образования графита хлопьевидной формы.

В результате отжига из хрупкого и твёрдого белого чугуна получается более пластичный и менее хрупкий ковкий чугун.

Существенными недостатками графитизирующего отжига отливок из белых чугунов являются длительность процесса, составляющая 24-60 часов, высокая температура его осуществления 1023 – 1323 К, необходимость в больших производственных площадях для размещения нагревательных агрегатов, ограничение толщины стенок отливок. Отмеченные обстоятельства обуславливают дороговизну процесса графитизирующего отжига в основном из-за энергопотребления (дополнительный удельный расход электроэнергии на графитизирующий отжиг составляет ≈ 450 кВт*ч/т).

В настоящее время конкуренцию технологии графитизирующего отжига белого чугуна составляет компактирующее модифицирование жидкого чугуна [2, с. 217], результатом которого также является образование компактного графита в структуре затвердевшего металла. Многие недостатки графитизирующего отжига белого чугуна рассматриваемой технологией устранены и в первую очередь высокие энергозатраты, которые в суммарном отношении приближены к таковым при получении серых чугунов (≈ 800 кВт*ч/т). Речь идёт о высокопрочном чугуне, который характеризуется шаровидной или близкой к ней формой включений графита. Этот чугун

получают модифицированием жидкого чугуна присадками Mg, Ce, Y, Ca и некоторых других элементов (в чистом виде или в составе сплавов). Шаровидный графит в наименьшей степени ослабляет металлическую матрицу, что приводит к резкому повышению механических свойств чугуна с чисто перлитной или бейнитной структурой, приближая их свойства к свойствам углеродистых сталей. При чисто ферритной матрице (в литом или термообработанном состоянии) обеспечивается повышенный уровень пластичности. Высокопрочный чугун обладает хорошими литейными и технологическими свойствами (жидкотекучесть, линейная усадка, обрабатываемость резанием), но по значению сосредоточенной объёмной усадки приближается к стали. Такой чугун применяется для замены стальных литых и кованых деталей (коленчатые валы двигателей, компрессоров и т.д.), а также деталей из ковкого или обычного серого чугуна.

Однако, технология компактирующего модифицирования жидкого чугуна с получением в его структуре графита вермикулярной и шаровидной формы не свободна от существенных недостатков, главными из которых являются: 1 использование модификаторов, содержащих дорогие и дефицитные элементы магний, церий, иттрий, никель, медь; 2 нестабильность результатов процесса ввиду сильной зависимости от воздействия факторов научной парадигмы ЯСН (явление структурной наследственности) [3, с. 425].

Нами предложена альтернативная технология [4, 5]получения чугунов с компактными формами графита, которая не требует ни графитизирующего отжига, ни компактирующего модифирования жидкого чугуна и вследствие этого свободна от перечисленных выше недостатков, характерных для указанных традиционных технологий. Суть предложенного нами технологического процесса базируется на синергетическом комплексе литейно-металлургических факторов, воздействующих на чугун в стадиях приготовления его расплава и кристаллизации в литейной форме. Одним из компонентов указанного комплекса является использование в качестве

шихтовых материалов при приготовлении расплава чугуна дисперсных отходов машиностроения, содержащих окисленное железо (например, кузнечная окалина). Указанные отходы не имеют в своём составе вредных примесей таких, как S и P. Поэтому получаемый из них чугун отличается чистотой по отношению содержания в них поверхностно-активных элементов, что является непременным условием графитизации чугунов в компактной форме. Кроме того, разработанная нами технология получения расплава чугуна из дисперсных отходов машиностроения переводит его в разряд первородных, то есть лишённых каких-либо наследственных признаков в том числе и отрицательных, препятствующих образованию компактных форм кристаллизующегося графита. Данная технология синтезирования расплава чугуна предусматривает также его перегрев, способствующий гомогенизации и, как следствие, переохлаждению при переходе в твёрдую фазу. Это обстоятельство также является компактирующим фактором в образовании графитных включений в металлической матрице чугуна. Описанные выше условия формирования расплава чугуна удовлетворяют термодинамическому критерию компактной графитизации в виде химического потенциала углерода в упорядочениях карбидного типа. Согласно этому критерию компактная графитизация тем вероятнее, чем выше перегрев расплава и выше его склонность к метастабильной кристаллизации. В этом случае создаются условия формирования в расплаве карбидообразной флуктуации, в которой активность углерода определяет достаточно высокий термодинамический потенциал графитизации. Величина последнего зависит от совокупности ряда условий: наличие третьих элементов, которые образуют в расплаве с железом и углеродом квазихимические упорядочения; температура перегрева расплава; степень его рафинирования по поверхностно-активным веществам. В нашем случае создание и "разрядка" термодинамического потенциала компактной графитизации обусловлены перегревом расплава в надкритическое состояние, в котором создается потенциал компактной

графитизации на базе образования упорядоченных макрозон с псевдокарбидной стехиометрией. Разрушение этих зон, приводящее к образованию точечного графита – строительного материала для образования компактных включений графита, осуществляется оптимальным режимом переохлаждения и кристаллизации высоко перегретых и глубоко рафинированных расплавов.

Исходя из первостепенности значения проблемы компактирования графитных образований в чугунах систем Fe-Si-C и Fe-Al-C, нами было найдено достаточно стабильное решение указанной проблемы на этапе формирования твёрдой фазы из жидкого состояния путём регламентированного охлаждения. Указанное решение также не требует использование модифицирующего воздействия на жидкий металл. Согласно разработанной технологии расплав чугуна вначале подвергается закалке из жидкого состояния путем заливки в металлическую форму, находящуюся в соляной ванне с температурой 750-850°С. Затем производится изотермическая выдержка в течение 0,5-2 часов при температуре 950-1100°С с последующим охлаждением. Указанный регламентируемый температурный режим заливки чугуна в форму и его охлаждения позволяет для чугунов системы Fe-C-Si получить в структуре компактную форму графитных включений. Данный регламентируемый температурный режим заливки чугуна в форму и его охлаждения направлен на фиксацию в затвердевшем чугуне метастабильной структуры, в которой углерод находится в связанном состоянии. Последующая изотермическая выдержка приводит к распаду метастабильной структуры с образованием графита компактной формы. При этом следует отметить, что обсуждаемая технология компактирования графита в чугунах примечательна тем, что отсутствует необходимость рафинирования расплава от поверхностно активных элементов. Таким образом, предложенные нами технологические решения получения чугунов с компактными формами графита в отличие от традиционных является и ресурсосберегающими, так как использует дисперсные отходы

машиностроения, и энергосберегающими, так как по этой характеристике не уступает обычным серым чугунам.

Нами также был предложен технологический процесс получения чугунов с компактными формами графита [6], который кардинально решает проблему энергосбережения, поскольку перестал стоять вопрос об обеспечении энергией извне. В основу обсуждаемого технологического процесса положен самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС), при котором необходимое количество высвобождающейся энергии для протекания процесса, перевода твёрдых материалов в жидкое перегретое состояние заложено в шихтовых материалах. При этом шихта полностью составлена из дисперсных отходов машиностроения (кузнечная окалина, алюминиевая и графитовая стружки, отработанный абразивный инструмент из карбида кремния). Кузнечная окалина, содержащая порядка 70 % окисленного железа, которое, будучи восстановленным, является основой чугуна. В качестве восстановителя предлагается использовать силуминовую стружку, которая наряду с сильным восстановителем (Al) содержит основной легирующий элемент в чугуне Si. Таким образом, комбинация: кузнечная окалина – силуминовая стружка в определённом соотношении между собой создаёт предпосылки получения чугуна из указанных дисперсных отходов машиностроения путём осуществления между компонентами процесса СВС.

Для проведения процесса СВС составили шихту при следующем соотношении компонентов – кузнечная окалина: силуминовая стружка (АК18): аммиачная селитра: известь: графитовая стружка = 100:57:62:21:0,5. Компоненты шихты тщательно перемешивались и помещались в графитовый цилиндр, который совершал вращательное движение таким образом, чтобы шихта и продукты процесса подвергались воздействию центробежной силы. Для создания искусственной гравитации с коэффициентом $\kappa = \frac{a}{g} = 100$ использовалась формула подбора частоты вращения (n, $\frac{об.}{мин}$) графитового цилиндра:

$$n = \frac{300\sqrt{k}}{r}, \qquad (1)$$

где r – радиус вращения графитового цилиндра.

На рисунке 1 представлена микроструктура синтезированного по предложенной нами технологии жаростойкого чугуна марки ЧС5Ш. Металлическая матрица представлена кремнистым ферритом с небольшими участками перлита. Включения графита имеют компактную и точечную форму. Образование компактного графита в структуре чугуна обусловлено высокими скоростями нагрева, перегрева и охлаждения жидкого СВС-чугуна, легированием его магнием и минимизацией в составе поверхностно-активных элементов.

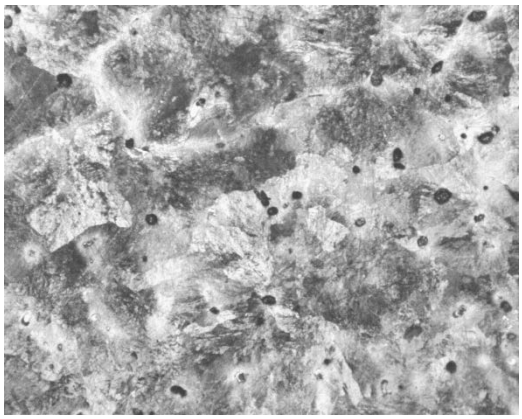

Рис.1 . Микроструктура СВС-чугуна, х 200

Характерной особенностью условий кристаллизации СВС-чугуна является наличие повышенного переоолаждения, обусловленного как гомогенизацией расплава, так высокой тепловой активностью графитовой формой. Нами были проведены исследования кристаллизации СВС-чугуна методом термического анализа, который осуществлялся с помощью многоточечной автоматической системы (АИСТ), позволяющей записывать кривые охлаждения и дифференциальные кривые *dT/dt.* При этом в качестве датчика температуры была использована термопара ВР5/20. Было установлено, что кристаллизационные процессы протекают с переохлаждением, равным 6,2 градуса. При проведении процесса СВС в условиях искусственной гравитации следует ожидать большего значения

переохлаждения ввиду повышения температуры кристаллизации железа с ростом давления [7, с. 1102].

Шихта процесса СВС чугуна составлена таким образом, что наряду с кузнечной окалиной в качестве окислителя используется также аммиачная селитра. При её восстановлении образуется оксид алюминия и газообразные продукты реакции, содержащие азот. Известно [8], что при протекании процесса СВС в газовой фазе на основе азота образуются нитриды, карбиды и карбонитриды при условии наличия в шихте элементов, обладающим сродством к азоту и углероду. В нашем случае такими элементами являются алюминий и кремний. Указанные тугоплавкие частицы, присутствующие в металлической фазе, имеют размер в несколько нм [10] и выступают в роли многочисленных центров кристаллизации как структурных составляющих металлической матрицы [11], так и графитных включений [12].

Таким образом, предложенные нами технологические процессы получения графитизированных чугунов, способствующих формированию компактных форм графита без модифицирующей обработки жидкого состояния, открывают новые перспективы в производстве качественных чугунных отливок с решением проблем экономии материальных и энергетических ресурсов. В научном плане указанные технологические процессы представляют собой основу новой парадигмы – компактирование в графитизированных чугунах без модифицирования его жидкого состояния.

Литература

1 Парфенов В.Д. Структура, свойства и применение чугунов: Учебное пособие. – М.: МГУПС (МИИТ), 2016. – 53 с.

2 Трухов А.П., Маляров А.И. Литейные сплавы и плавка. Учебник для студентов вузов. — М.: Академия, 2004. — 336 с.

3 Никитин В.И., Никитин К.В. Наследственность в литых сплавах. - М.: Машиностроение-1, 2005. - 476 с.

4 Бикулов Р.А., Сафронов Н.Н. Технологический процесс гарантированной компактной графитизации чугунов // Литейщик России. – 2010. - № 1. – С. 34-36.

5 Способ получения алюминиевого чугуна с компактными включениями графита RU 2487950 C 1, МПК C21C 1/10 (2006.01) / Бикулов Р.А., Сафронов Н.Н., заявитель и патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Камская государственная инженерно-экономическая академия" (ИНЭКА) (RU) - № 2012114478; Заявл. 13.04.2012; Опубл. 20.07.2013, Бюл. № 20.

6 Бикулов Р.А., Сафронов Г.Н., Харисов Л.Р. СВС-Ферросилиды из дисперсных отходов машиностроения // Литейщик России. - 2010. - № 8. — С. 15 – 17.

7 Физические величины: Справочник / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.; Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

8 Зиатдинов М.Х., Шатохин И.М. Самораспространающийся высокотемпературный синтез азотированного феррохрома // Сталь. – 2009. № 9. – С. 48 – 53.

10 Корчинский М. Передовые металлические конструкционные материалы и новая роль микролегированных сталей // Сталь. – 2005. № 6. – С. 124 – 130.

11 Чуманов В.И., Чуманов И.В., Аникеев А.Н., Гарифулин Р.Р. Упрочнение поверхностных слоёв при формировании полой заготовки методом центробежного литья // Электрометаллургия. – 2010. № 1. – С. 33 – 36.

12 Макаренко К.В. Управление процессами структурообразования в отливках из легированного серого чугуна // Изв. Вузов. Чёрная металлургия. – 2010. № 1. – С. 45 – 49.

Safronov N.N. Doctor of Engineering Sciences, Full Professor, Naberezhnye Chelny Institute of Kazan (Volga region) Federal University;
Kharisov L.R. Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Naberezhnye Chelny Institute of Kazan (Volga region) Federal University;
Safronov G.N. Naberezhnye Naberezhnye Chelny Institute of Kazan (Volga region) Federal University.

COMPACTING IN GRAPHITIZED CAST IRONS WITHOUT MODIFICATION OF ITS LIQUID CONDITION

Abstract: The alternative technological processes for the production of cast iron with compact forms of graphite inclusions are presented. The first technological process is based on a synergetic complex of casting-metallurgical factors affecting cast iron in the stages of its melt preparation and crystallization in the mold. The second resource-saving and non-waste technological process is based on the process of self-propagating high-temperature synthesis.

Key words: graphitized cast iron; compact graphite; modifying