

УДК 621.74.02:  
669.13

S. Douson,  
A.G. Panov,  
D.A. Gurtovoi,  
S.A. Anikin

Аннотация

Summary

## Технология стабильного получения вермикулярного графита в отливках массового производства

## Technology of stable obtaining of vermicular graphite in mass-produced castings

С. Доусон, А.Г. Панов, Д.А. Гуртовой, С.А. Аникин

В статье представлены основные принципы метода стабилизации высокой доли вермикулярного графита (ВГ) в отливках из чугуна с вермикулярным графитом (ЧВГ) с помощью термического анализа (ТА) расплава. Представлены техническая реализация метода и результаты его применения в производственных условиях. Показано, что разработанные технологии позволяют резко сократить издержки производства отливок из ЧВГ, за счет снижения их дефектности и расхода модификаторов чугуна.

### Ключевые слова

ЧВГ, стабильная технология, термический анализ.

The basic principles of stabilization of receiving a high share of vermicular graphite in castings from CGI are presented in article. Technical realization of the principles and results of their application under production conditions are presented. It is shown that the developed technologies allow sharply to reduce costs of production of castings from CGI by scrap decrease and modifiers decrease.

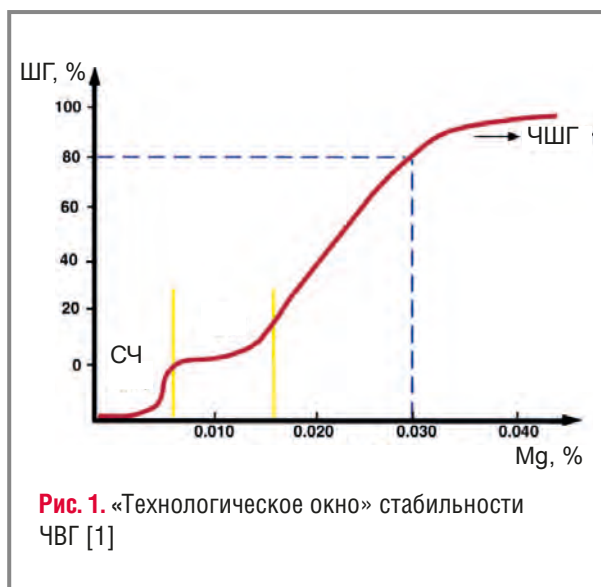
### Key words

CGI, stable technology, thermal analysis.

Мировой опыт последних 20 лет развития серийных и массовых производств из ЧВГ таких сложных компонентов, как *блоки и головки блоков цилиндров* двигателей показал, что только доля ВГ  $\geq 80\%$ , при доле шаровидного графита (ШГ)  $\leq 20\%$  и отсутствии пластинчатого графита (ПГ), обеспечивает оптимальную комбинацию литейных свойств, прочности, механической обрабатываемости и теплопроводности ЧВГ [1]. Эти требования закреплены в обновлённом в про-

шлом году Международном стандарте ISO 16112 на отливки из ЧВГ, а также спецификациями на ЧВГ > 20 мировых производителей автомобилей.

На старте освоения ЧВГ большинство стран рассматривали его как чугун с содержанием ШГ до 50%, а в России ГОСТ 28394-89 допускает его содержание до 40%. Однако это оказалось приемлемо только для простых отливок [2], поскольку высокая доля ШГ резко увеличивает склонность сложных отливок к образованию усадочных рако-



вин и пористости, а также приводит к тепловым откатам при эксплуатации двигателей.

Недавно этот факт признали китайские литейщики и специалисты автопрома, которые, вместо стандарта JB 3829, изданного в 1999 г. и допускающего долю ШГ в ЧВГ до 50%, для удовлетворения требований внутреннего и внешнего рынков отливок из ЧВГ в 2011 г. утвердили новый стандарт GB/T 26655, устанавливающий долю ШГ в ЧВГ 0...20%.

Новейшее требование иметь в структуре ЧВГ стабильное содержание доли ВГ  $\geq 80\%$ , а в отдельных случаях и  $\geq 90\%$  [1] выдвигает новые требования к литейной технологии [3], которая должна гарантировать его эксплуатационные свойства при дальнейшем изготовлении из литой заготовки конечного изделия.

Кроме того, для рентабельности литейного предприятия технология должна обеспечивать изготовление сложных по конфигурации и герметичных отливок из ЧВГ с минимальной дефектностью, в частности, по усадке.

Известно, что технологии изготовления ЧВГ во многом аналогичны процессам получения ЧШГ, поскольку в основе производства ЧВГ лежит обработка расплава Mg-содержащими модификаторами. Для обеспечения максимальной жидкотекучести и предсудачного расширения при кристаллизации чугуна обычно содержит 3,6...3,8% С. Перлит может быть стабилизирован добавлением Si и/или Sn.

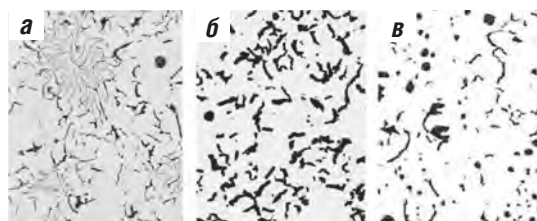
Также для придания специальных свойств могут быть добавлены другие легирующие элементы. Например, для жаростойкости *выпускных коллекторов* ЧВГ легируют Si и Mo, в то время, как для

износостойкости *гильз блоков цилиндров* – P, Ni и Cr. К отливкам из ЧВГ могут быть применены традиционные для ЧШГ виды термообработки, включая изотермическую закалку.

Главное отличие технологии получения ВГ от ШГ – значительно более узкое концентрационное «технологическое окно» содержания в расплаве Mg (**рис. 1**, [1]), составляющее  $\leq 0,01\%$ , в то время, как для получения ШГ обычно это 0,03% (0,03...0,06%) и даже 0,5%. Кроме того, «технологическое окно» стабильности ЧВГ (**рис. 1**) граничит с резким переходом к серому чугуну на левой стороне и постепенным переходом к повышению доли ШГ вплоть до ЧШГ на правой стороне.

Помимо Mg, элементами, влияющими на форму ВГ, являются все поверхностно-активные элементы (ПАЭ) – S, O, Mg, PЗМ, ЩЗМ, Bi, Te и др.), а также значительно влияющие на коэффициенты активности ПАЭ (Ti, N и др.). Однако большинство этих элементов в настоящее время в производственных условиях не контролируют вовсе. Результаты же спектрального анализа контролируемых элементов дают представление лишь об их общем содержании в чугуне, но не о том, в каком виде они находятся, в связанном в неметаллические включения (НМВ) или растворённом. Поскольку НМВ влияют на зародышеобразование графита при кристаллизации, а растворённые ПАЭ – на скорость и направление роста графитовых включений, то простой контроль химсостава предоставляет весьма ограниченную информацию для гарантированного получения ВГ.

Чувствительность структуры ЧВГ к флуктуациям содержания в нём растворённого Mg и количества зародышей графита проиллюстрированы **рис. 2** [1], на котором представлены микроструктуры об-



**Рис. 2.** Изменение микроструктуры графита при последовательном вводе в расплав Mg и инокулирующего модификатора; расплав: **а** – с предварительной обработкой Mg, **б** – с добавкой 0,001% Mg, **в** – с добавкой 0,08% инокулирующего модификатора

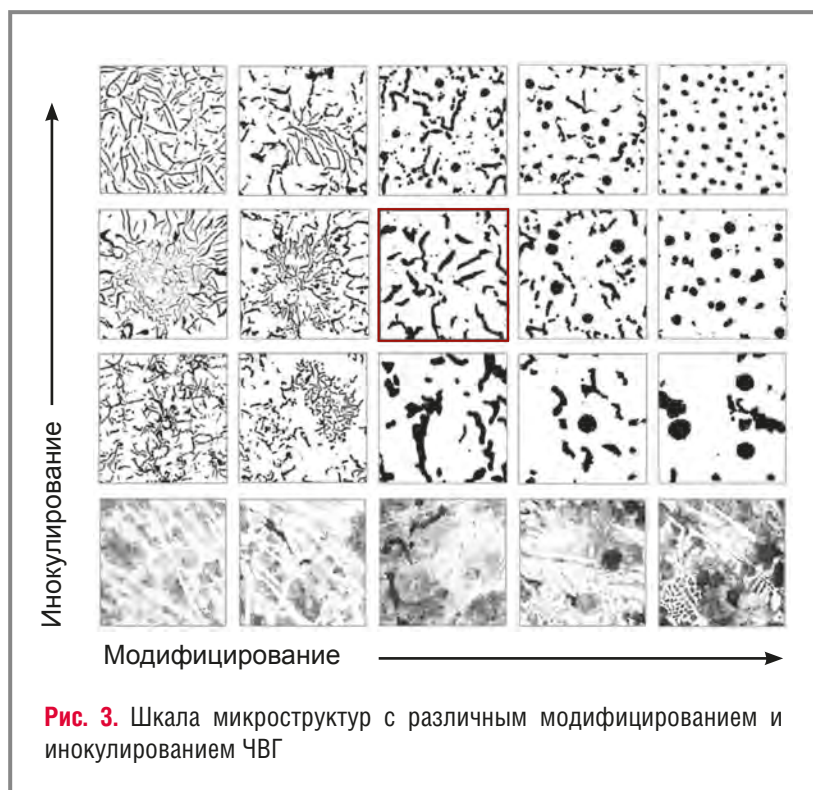
разцов  $\varnothing$  25 мм, полученных в производственных условиях из металла 1-т ковша, в который с помощью проволоки вводили по очереди, сначала Mg, а затем – инокулирующий модификатор.

Структура на **рис. 2, а** с незначительным количеством ВГ и ШГ получена при недостаточном количестве Mg. Структура на **рис. 2, б** без ПГ и количеством ШГ  $\leq 5\%$  получена при дополнительном вводе лишь 10 г (0,001%) Mg. Структура на **рис. 2, в** с увеличением доли ШГ  $\geq 35\%$  получена за счёт увеличения центров кристаллизации графита при последующем вводе в расплав чугуна 0,8 кг (0,08%) инокулирующего модификатора.

Требование одновременно управлять вводом сфероидизирующих и инокулирующих модификаторов иллюстрировано **рис. 3**, из которого видно, что ЧВГ обладает оптимальной структурой при определённом сочетании модифицирования и инокулирования (структура выделена красным квадратом). Отклонения от оптимального модифицирования приводят к увеличению доли ШГ, либо к катастрофическому росту доли ПГ. Отклонения от оптимального процесса инокулирования ухудшают распределение (однородность) графита.

Производственная ситуация при изготовлении отливок из ЧВГ дополнительно осложняется тем, что на точность попадания в «технологическое окно» и, как следствие, на структуру отливок влияют:

- условия модифицирования (температура, метод, размер и конструкция ковша, элементный, фазовый и фракционный состав сфероидизирующих и графитизирующих модификаторов);



**Рис. 3.** Шкала микроструктур с различным модифицированием и инокулированием ЧВГ

- условия кристаллизации (материал и масса формы, конструкция литниково-питающей системы, характеристические сечения, разностенность и длинномерность отливок).

Помимо этих металлургических факторов, при серийном производстве ЧВГ есть много переменных, вносящих погрешности в литейный процесс, таких, как флуктуации наследственного структурного состояния расплава перед модифицированием, масса и места добавления модификаторов, их состав и свойства, масса и температура металла в ковше, температура ковша, скорость его заполнения и др.

Все это объясняет существующие проблемы нестабильного получения высокой доли ВГ в отливках. В то же время, эту проблему, очевидно, можно решить предварительной обработкой расплава с *недомодифицированием* и *недоинокулярованием* на одну из микроструктур ш к а -

лы модифицирования (ШМ) ЧВГ (**рис. 3**) левее и ниже красного квадрата, с экспресс-контролем её расположения на шкале и последующим домодифицированием и доинокулированием, в зависимости от полученной при контроле информации.

В качестве экспресс-контроля, при этом, как было показано выше, не может быть использован контроль химсостава, который не учитывает много значимых элементов, а также состояния, в которых они находятся.

В то же время, в теории и практике контроля качества чугунных расплавов известен метод ТА, который позволяет получать кривые охлаждения расплава в области температур кристаллизации (кристаллизационные кривые) – **рис. 4**, которые коррелируют с процессом зарождения и роста твёрдых фаз.

Компьютерные методы обработки информации позволяют



достаточно широко использовать ТА для оптимизации производственных процессов, но пока лишь за рубежом. В частности, его применяют при получении отливок из ЧШГ для выбора:

- его оптимального химсостава (чаще всего, с эвтектическим углеродным эквивалентом);
- оптимальных модификатора и инокулянта и их расходов;
- оптимальной температуры заливки и времени выдержки металла в ковше;
- определения необходимости вторичного инокулирования и др.

Достижения в управлении технологией модифицирования с помощью ТА при изготовлении отливок из ЧШГ распространили и на ЧВГ. Исследования показали, что с помощью ТА по характеру поведения кривых, связанному с различием их зародышеобразования и скоростей роста графита, удаётся чётко дифференцировать формирование ПГ, ВГ или ШГ (**рис. 4**).

Таким образом, вместо того, чтобы развивать методы контроля химсостава для прогнозирования формы графита с неочевидной перспективой их надёжности, предложена новая схема управления процессом формирования ВГ, заключающаяся в применении ТА для непосредственного измерения положения на ШМ ЧВГ (см. **рис. 3**) и последующей корректировке состояния расплава дополнительным модифицированием и инокулированием.

Схема технологического процесса, основанная на новом взгляде на процесс формирования высокой доли ВГ в отливках, заключается в следующем.

В базовом чугунном расплаве в печи нет Mg, мало центров кристаллизации графита и случайное содержание в растворённом виде кислорода, серы и других десфериодизаторов.

Во время предварительной обработки сфероидизирующим и инокулирующим модификаторами Mg, ЦЗМ, РЗМ из этих модификаторов сначала связывают активные кислород, серу и десфериодизаторы, а оставшиеся после этого активные элементы модификаторов «забрасывают» расплав в область ШМ ЧВГ, в какое-то случайное положение шкалы левее и ниже «технологического окна» ЧВГ, которое заранее назначают таким образом, чтобы, при известном естественном затухании эффекта модифицирования, обеспечить необходимую структуру отливок в течение всего времени разливки чугуна.

Затем, с помощью ТА, точно определяется местоположение ЧВГ на ШМ и корректируются координаты расплава, т.е. его перемещение в положение технологического окна дополнительным экспресс-модифицированием. При этом, корректировка осуществляется с помощью заранее определённых безразмерных индексов (0...100), связывающих ШМ ЧВГ расход проволоки, соответственно, с содержанием инокулятора и Mg. ШМ ЧВГ может быть заменена на простую номограмму, где, вместо микроструктур, представлены измеряемые при ТА показатели.

При отработке новой технологии в производственных условиях столкнулись со следующей методической проблемой. Кристаллизационные кривые для ТА, как правило, получают при измерении температуры металла в образцах, залитых в стаканчики типа изображённого на **рис. 5, а**. Практика





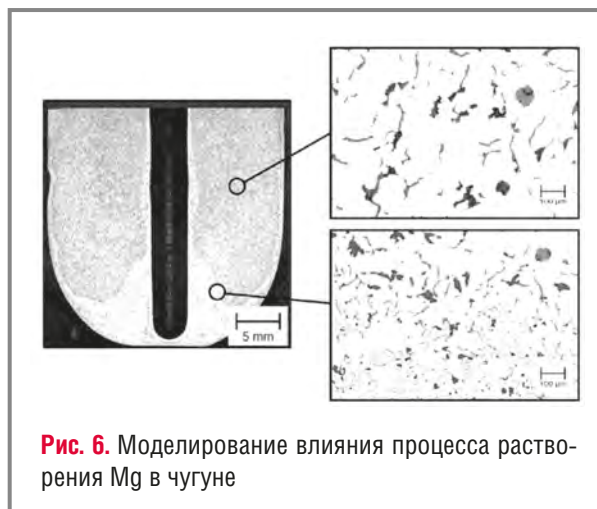
показала, что, в то время, как с использованием обычных стаканчиков получают воспроизводимые результаты контроля температуры начала кристаллизации первичного аустенита, их геометрия и условия охлаждения не позволяют получать воспроизводимые результаты контроля микроструктуры чугуна.

Для обычных стаканчиков из-за ряда причин не удаётся создать воспроизводимых условий теплоотвода. Потребовалось спроектировать отборник проб для ТА, который бы исключал недостатки стандартных стаканчиков, для чего фирмой Sinter-Cast была разработана погружная капсула для ТА (рис. 5, б).

Образец для ТА получают в такой капсуле при её погружении в расплав за ~2 с. Этот метод отбора минимизирует окисление и одновременно предварительно прогревает пробоотборник, чтобы обеспечить воспроизводимые условия охлаждения и кристаллизации расплава в капсуле. Для получения большей информации для ТА в капсуле размещают двойную термопару, с одним спаем в тепловом центре образца и вторым – у основания защитной трубки термопары. Для увеличения точности ТА разработана система моделирования влияния процесса растворения Mg в чугуне на его микроструктуру, что достигается покрытием стенки у основания капсулы специальным реактивным материалом, который забирает активный Mg из чугуна (рис. 6).

На основе результатов исследования разработана технология стабильного получения ВГ в отливках массового производства, которая включает предварительное модифицирование и инокулирование базового печного расплава любым традиционным методом. Сразу после предварительного модифицирования производят анализ кристаллизационных кривых, с помощью разработанных пробоотборника и аналитического программного комплекса. В зависимости от результата ТА, система автоматической подачи проволоки корректирует содержание Mg и инокулятора в расплаве.

Разработанную технологию опробовали при производстве мощных блоков двигателя, с использованием 281 серийно залитых ковшей. Основное модифицирование осуществляли подачей проволоки с наполнителем в 2,3-т ковш, на основе статистически оптимизированного расхода модификатора по результатам ТА методом SinterCast предыдущих ковшей и в зависимости от содержания S в базовом расплаве, массы и температуры металла в ковше.



**Рис. 6.** Моделирование влияния процесса растворения Mg в чугуне

Производственные условия требовали содержания ШГ в ЧВГ в пределах 0...20%,  $\sigma_b \geq 380$  МПа и отсутствие пористости, что, как было выявлено опытным путём, потребовало дополнительного ограничения прочности  $\leq 460$  МПа. Базовое модифицирование привело к получению прочности чугуна в недопустимо широком диапазоне 260...440 МПа, что больше, чем в 2 раза превышало требуемый.

Поэтому, даже если бы для достижения минимального уровня требуемой прочности на всех ковшах расход модификаторов был бы просто увеличен на постоянную величину, то металл во многих ковшах оказался бы «перемодифицированным» и забракованным. Дополнительная корректировка процесса модифицирования по методу SinterCast позволила получить металл во всех 281 ковшах, отвечающий необходимым требованиям.

## Выводы

- В связи с возрастающими сложностью геометрии и требований к отливкам из ЧВГ технологии литейного производства должны надёжно управлять процессом их изготовления, гарантируя стабильное производство качественных отливок.
- Для решения этой задачи предлагается новая схема управления формированием высокой доли ВГ в ЧВГ, основанная на применении, вместо традиционного контроля химсостава базового чугуна, систему ТА SinterCast, включающую новый подход к контролю кристаллизационных кривых и использование полученных результатов контроля для управления процессом модифицирования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **SinterCast** [Электронный ресурс]: Process control for the reliable high volume production of compacted graphite iron / Техническая информация SinterCast. URL: <https://sintercast.com/library/technical-publications> (дата обращения 07.01.2018).

2. **Гуртовой Д.А., Панов А.Г., Закиров Э.С.** Формирование вермикулярного графита в чугунах при переменном содержании серы в расплаве // Литейное производство. – 2016. – №5. – С. 2–3.

3. **Панов А.Г.** Стабильное модифицирование высокопрочных чугунов. Метод, модификаторы, технологии // LAP LAMBERT Academic Publishing. – Saarbrücken, Deutschland, 2013. – 342 с.

## Сведения об авторах

**Доусон Стив** – Президент фирмы SinterCast, Швеция, Стокгольм. E-mail: [steve.dawson@sintercast.com](mailto:steve.dawson@sintercast.com)

**Панов Алексей Геннадьевич** – д-р техн. наук, доц., проф. кафедры МТК НЧИ КФУ, гл. науч. сотр. ООО «Исследовательский центр Модификатор», г. Наб. Челны. Тел.: +79172703043. E-mail: [panov.ag@mail.ru](mailto:panov.ag@mail.ru)

**Гуртовой Дмитрий Андреевич** – гл. инженер ЛЗ ПАО «КАМАЗ», аспирант кафедры МТК НЧИ КФУ. Тел.: +79061232987. E-mail: [gurtovoyda@mail.ru](mailto:gurtovoyda@mail.ru)

**Аникин Сергей Александрович** – технический директор компании AVL List GmbH (представительство Москва). Тел.: +89091582807. E-mail: [sergey.anikin@avl.com](mailto:sergey.anikin@avl.com)

# 14 международная специализированная ВЫСТАВКА

# ЛИТЬЕ

# 22 - 24 мая 2018



КЛЮЧЕВОЕ СОБЫТИЕ ВЫСТАВКИ

 **XIV Международная конференция  
«Литье. Металлургия 2018»**

Организаторы:



Запорожская торгово-промышленная палата



Ассоциация литейщиков Украины



Национальная металлургическая академия Украины



Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины



Национальный университет «Харьковский политехнический институт»

**КОСАК  
ПАЛАЦ**

 **[www.expo.zp.ua](http://www.expo.zp.ua)**

**Запорожье УКРАИНА**



Контакты: Запорожская торгово-промышленная палата тел.: +38 (061) 213-50-26 [expo2@cci.zp.ua](mailto:expo2@cci.zp.ua)