

# ТЕХНОЛОГИЯ СТАБИЛЬНОГО ПОЛУЧЕНИЯ ВЕРМИКУРЯРНОГО ГРАФИТА В ОТЛИВКАХ МАССОВОГО ПРОИЗВОДСТВА

## PROCESS CONTROL FOR THE RELIABLE HIGH VOLUME PRODUCTION OF COMPACTED GRAPHITE IRON

С. Доусон<sup>1</sup>, А. Панов<sup>2,3</sup>, Д. Гуртовой<sup>3,4</sup>, С. Аникин<sup>5</sup>

<sup>1</sup>SinterCast, Швеция, <sup>2</sup>НЧИ КФУ, <sup>3</sup>ИЦМ, <sup>4</sup>КАМАЗ, г. Набережные Челны, <sup>5</sup>AVL, Австрия

### Аннотация

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

### Ключевые слова

ЧВГ, стабильная технология, термический анализ

### Summary

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.

### Keywords

CGI, stable technology, thermal analysis

Требования законодательства к уменьшению выбросов вредных веществ и потребителей к увеличению рабочих характеристик при уменьшении размеров силовых агрегатов продолжают стимулировать разработку двигателей пассажирских и коммерческих автомобилей. Современным решением этой задачи может стать использование проектировщиками двигателей чугуна с вермикулярным графитом (ЧВГ), обладающего большей на более чем 75% прочностью, 50% жесткостью и двойной циклической усталостью по сравнению с серым чугуном и силуминами [1]. За последние 20 лет мировой опыт развития серийных и массовых производств из ЧВГ таких сложных компонентов, как блоки и головки блоков цилиндров двигателей показал, что только высокая доля вермикулярного графита (ВГ) более 80% (низкая доля шаровидного графита (ШГ) менее 20%) при отсутствии пластинчатого графита обеспечивает оптимальную комбинацию литейных свойств, прочности, механической обрабатываемости и теплопроводности ЧВГ [2]. Эти требования закреплены в обновлённом в прошлом году международном стандарте ISO 16112 на отливки из ЧВГ, а также спецификациями на ЧВГ более 20-ти мировых производителей автомобилей.

На старте освоения ЧВГ большинство стран рассматривали его как чугун с широким содержанием доли шаровидного графита до 50%, а в России ГОСТ28394-89 до сих пор допускает содержание ШГ до 40%. Однако это оказалось приемлемо только для простых отливок [3], поскольку высокая доля ШГ резко увеличивает склонность к образованию усадочных раковин и пористости сложных отливок, а также приводит к тепловым отказам при эксплуатации двигателей. Последнее признание этого факта было сделано китайскими литейщиками и автомобилистами, которые вместо стандарта JB3829, изданного в 1999 году и допускающего долю ШГ в ЧВГ до 50%, в 2011 году утвердили новый стандарт GB/T 26655, устанавливаю-

щий долю ШГ в ЧВГ 0-20%, для удовлетворения требований внутреннего и внешнего рынков отливок из ЧВГ.

Новейшее требование иметь в структуре ЧВГ стабильно высокое содержание доли ВГ более 80%, а в отдельных случаях и более 90% [2] выдвигает новые требования к технологии литейного производства [4], которая должна гарантировать его технологические и эксплуатационные свойства при дальнейшем изготовлении из литой заготовки конечного изделия. Кроме того, для обеспечения рентабельности литейного завода, технология должна обеспечивать изготовление сложных по конфигурации отливок из ЧВГ с минимальным питанием и минимальной дефектностью, в частности, без усадки и негерметичности.

Известно [1], что технологии изготовления ЧВГ во многом аналогичны технологиям получения чугунов с шаровидным графитом (ЧШГ). Подобно ЧШГ, в основе производства ЧВГ лежит обработка расплава магний-содержащими модификаторами. Содержание углерода обычно находится в пределах 3,6-3,8% для обеспечения максимальной жидкотекучести и предвсудочного расширения при кристаллизации. Перлит аналогично может быть стабилизирован добавлением меди и/или олова. Так же для придания специальных свойств могут быть добавлены другие легирующие элементы. Например, для жаростойкости выпускных коллекторов ЧВГ легируют кремнием и молибденом, в то время как для износостойкости гильз блоков цилиндров – фосфором, никелем и хромом. К отливкам из ЧВГ могут быть применены традиционные для ЧШГ виды термической обработки, включая изотермическую закалку [5]. Главным отличием технологии получения ВГ от ШГ является значительно более узкое концентрационное "технологическое окно" содержания в расплаве магния (рисунок 1, [2]), составляющее менее 0,01%, в то время как для ШГ оно обычно составляет 0,03% (от 0,03% до 0,06%), а по данным [6] – 0,5% (от 0,02% до 0,07%). Кроме того, "технологическое окно" стабильности ЧВГ (рисунок 1, CGI) граничит с резким переходом к серому чугуну (Grey) на левой стороне и постепенным переходом к повышению доли ШГ (Nodularity) вплоть до ЧШГ (Ductile Iron) на правой стороне.

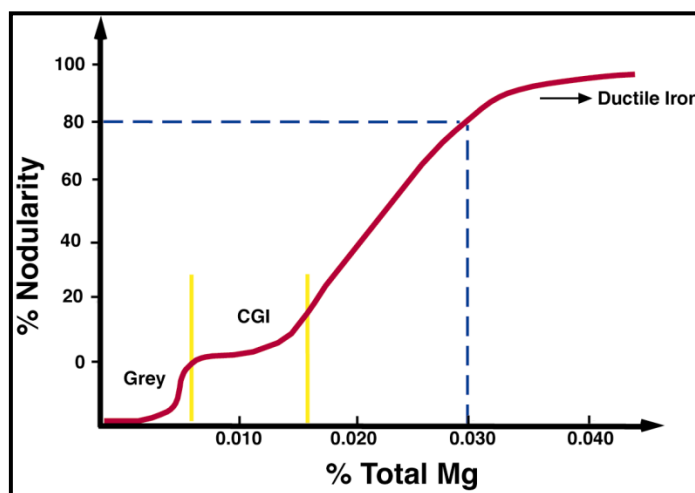
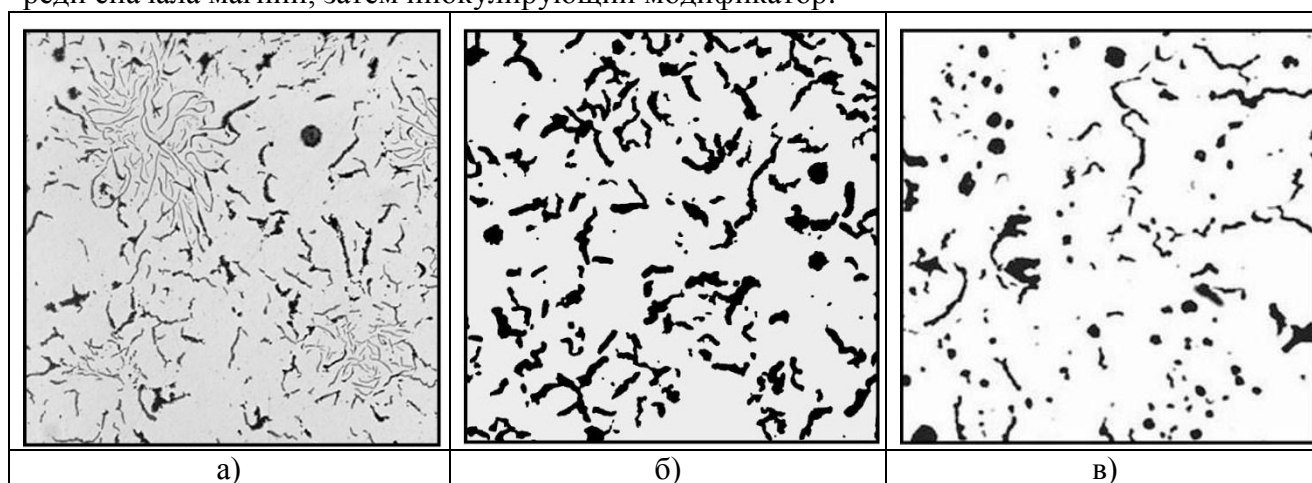


Рис. 1. Технологическое окно стабильности ЧВГ [2].

Помимо магния, как было отмечено на конференции [7], элементами, влияющими на форму ВГ, являются все поверхностно-активные (ПАЭ: S, O, Mg, PЗМ, ЩЗМ, Вi, Те и т.д.), а также элементы, значительно влияющие на коэффициенты активности ПАЭ (Ti, N и т.д.). Однако большинство этих элементов в настоящее время в производственных условиях не контролируются вовсе. Результаты же спектрального анализа контролируемых элементов дают лишь представление об их общем содержании в чугуне и не дают представления о том, в каком виде они находятся, в связанном в неметаллические включения или растворённом. Поскольку неметаллических включения влияют на зародышеобразование графита при кристаллизации, а растворённые ПАЭ – на скорость и направление роста графитовых включений, то простой контроль химического состава предоставляет весьма ограниченную информацию для гарантированного получения ВГ.

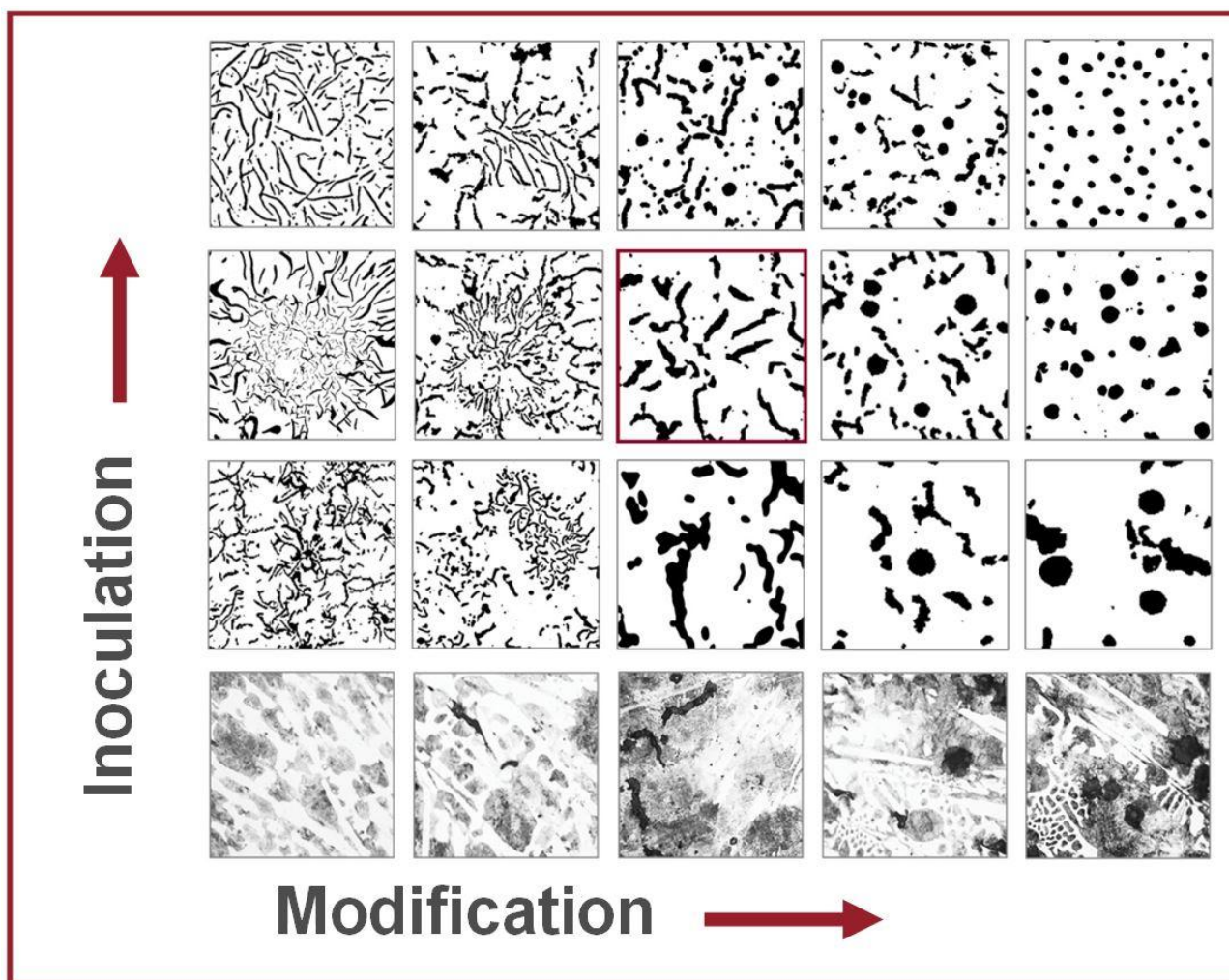
Чувствительность структуры ЧВГ к флуктуациям содержания в нём растворённого магния и количества зародышей графита проиллюстрированы на рисунке 2 [2], на котором представлены микроструктуры образцов диаметром 25 мм, полученных в производственных условиях из металла однотонного ковша, в который с помощью проволоки вводился по очереди сначала магний, затем инокулирующий модификатор.



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

Структура 2,а с незначительным количеством ВГ и ШГ получена при недостаточном количестве магния. Структура 2,б без пластинчатого графита и количеством ШГ менее 5% получена при дополнительном вводе лишь 10 граммов (0,001%) магния. Структура 2,в с увеличением доли ШГ более 35% получена за счёт увеличения центров кристаллизации графита при последующем вводе в расплав чугуна 0,8 кг (0,08%) инокулирующего модификатора.

Требование одновременно управлять и вводом сфероидизирующих модификаторов (модифицирование, Modification), и инокулирующих модификаторов (инокулирование, Inoculation) иллюстрировано рисунком 3. Как показано на рисунке, ЧВГ обладает оптимальной структурой при определённом сочетании модифицирования и инокулирования (структура выделена красным квадратом). Отклонения от оптимального модифицирования приводят либо к увеличению доли ШГ, либо к катастрофическому росту доли ПГ. Отклонения от оптимального инокулирования приводят к ухудшению распределения (однородности) графита.

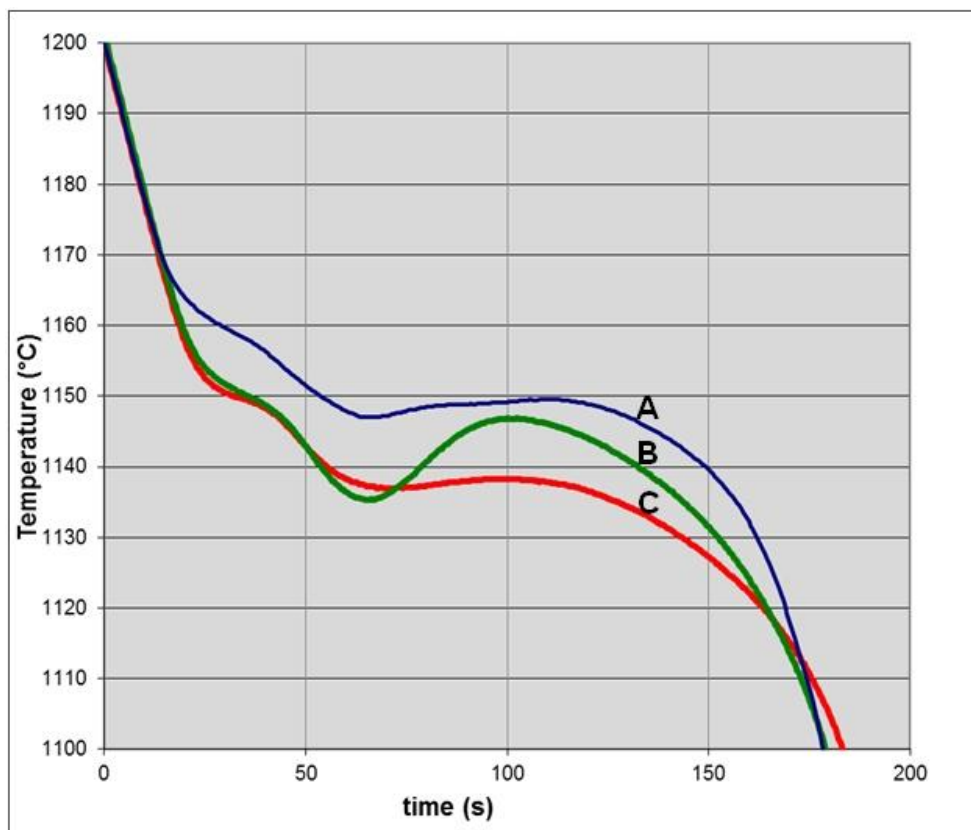


**Рис. 3.** Шкала микроструктур с различным модифицированием и инокулированием ЧВГ (ШМ ЧВГ)

Производственная ситуация при изготовлении отливок из ЧВГ дополнительно осложняется тем, что на точность попадания в "технологическое окно" и, как следствие, на структуру отливок влияют [7]: условия модифицирования (температура, метод, размер и конструкция ковша, элементный, фазовый и фракционный состав сфероидизирующих и графитизирующих модификаторов), 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 завода, таких как флуктуации наследственного структурного состояния расплава перед модифицированием, веса и места добавления модификаторов, состава и свойств модификаторов, веса металла в ковше, температуры металла, температуры ковша, скорости заполнения ковша, время разливки ковша и др.

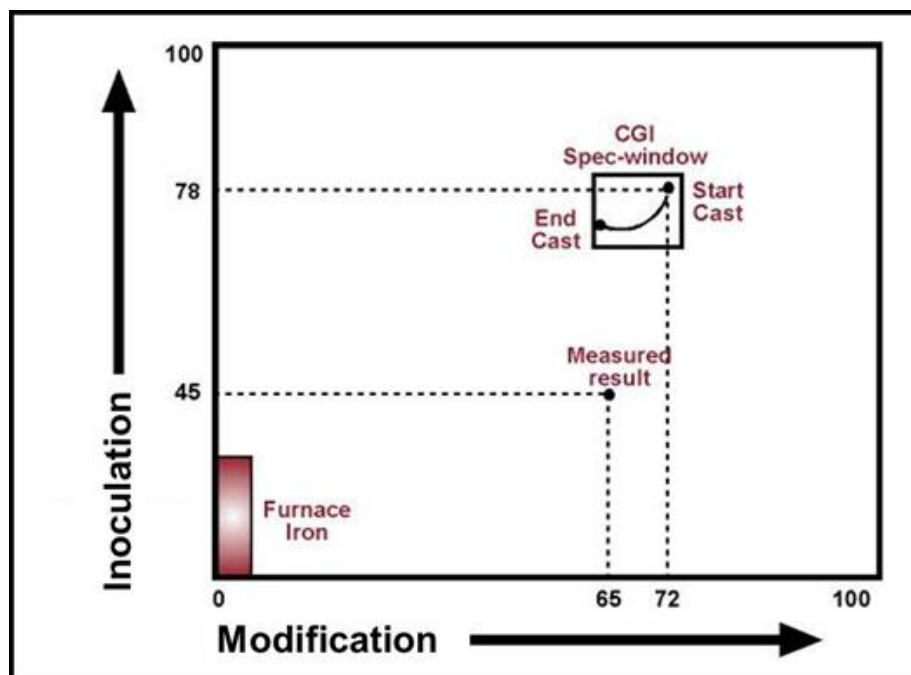
Вышесказанное поясняет объективность имеющейся в отечественном производстве проблемы нестабильного получения высокой доли вермикулярного графита в отливках из ЧВГ. В то же время, указанную проблему, очевидно, можно решить путём предварительной обработки расплава заведомо с "недомодифицированием" и "недоинокулярованием" на одну из микроструктур Шкалы Модифицирования ЧВГ (ШМ ЧВГ, рисунок 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 химического состава, в настоящее время не учитывающий много значимых элементов, а также состояния, в которых они находятся.

В то же время, в теории и практике контроля качества чугунных расплавов известен метод термического анализа [8]. При ТА получают кривые охлаждения расплава в области температур кристаллизации (кристаллизационные кривые, рисунок 4), которые коррелируют с процессом зарождения и роста твёрдых фаз. Развитие компьютерных методов обработки информации привело к тому, что, в отличие от отечественных литейных производств, за рубежом ТА уже достаточно широко используют для оптимизации производственных процессов. В частности, его применяют при получении отливок из ЧШГ для подбора оптимального химического состава чугуна (чаще всего, с эвтектическим углеродным эквивалентом) выбора оптимальных модификатора и инокулянта, а также их расходов, выбора оптимальной температуры заливки и времени выдержки металла в ковше, определения необходимости вторичного инокулирования и др.



**Рис. 4.** Кристаллизационные кривые чугуна: А – ЧПГ, В – ЧВГ, С – ЧШГ.

Достижения в области управления технологией модифицирования с помощью ТА при изготовлении отливок из ЧШГ распространили на ЧВГ. В результате исследований было выявлено, что с помощью ТА удаётся чётко дифференцировать формирование ПГ, ВГ или ШГ по характеру поведения кривых, связанному с различием их зародышеобразования и скоростей роста графита (рисунок 4). Таким образом, вместо того, чтобы развивать методы контроля химического состава для прогнозирования формы графита с неочевидной перспективой их надёжности, предложена новая философия управления процессом формирования ВГ, заключающаяся в применении ТА для непосредственного измерения положения на ШМ ЧВГ (рисунок 3) и последующей корректировке состояния расплава дополнительным модифицированием и инокулированием (рисунок 5).



**Рис. 5.** Схема новой философии формирования высокой доли ВГ в отливках

Как показано на рисунке 5, схема технологического процесса, основанная на новой философии формирования высокой доли ВГ в отливках, заключается в следующем. В базовом чугунном расплаве в печи (Furnace iron) нет магния, мало центров кристаллизации графита и случайное содержание в растворённом виде кислорода, серы и других десфероидазаторов. Во время предварительной обработки сфероидизирующим и инокулирующим модификаторами магний, ЦЗМ, РЗМ из этих модификаторов сначала связывают активные кислород, серу и десфероидазаторы, а оставшиеся от этой работы активные элементы модификаторов "забрасывают" расплав в область ШМ ЧВГ, в какое-то случайное положение шкалы левее и ниже "технологического окна ЧВГ" (CGI Spec-window, Технологическое окно ЧВГ заранее назначается таким образом, чтобы при известном естественном затухании эффекта модифицирования обеспечить необходимую структуру отливок в течение всего времени разлива чугуна от начала (Start Cast) до конца (End Cast)). Затем с помощью ТА производится точное определение местоположения на ШМ ЧВГ и соответствующая корректировка координат расплава, т.е. перемещение расплава в положение технологического окна с помощью дополнительного экспресс-модифицирования. При этом корректировка осуществляется с помощью заранее определённых безразмерных индексов (0...100 Inoculation и 0...100 Modification), связывающих ШМ ЧВГ с расходами проволоки, соответственно, с инокулятором и магнием. Как показано на рисунке 5, ШМ ЧВГ может быть заменена на простую номограмму, где вместо микроструктур представлены измеряемые при ТА показатели. В примере рисунка 5 для корректировки расплава необходимо добавить проволоку с магнием в количестве, эквивалентном 7 единицам Modification и проволоку с инокулятором в количестве, эквивалентном 33 единицам Inoculation. Калибровка расхода проволоки с наполнителем в метрах в зависимости от единиц индекса должна быть произведена для каждого литейного завода с учётом специфики его производства.

При отработке техники исполнения новой технологии в производственных условиях столкнулись со следующей методической проблемой. Получение кристаллизационных кривых для ТА, как правило, осуществляют при измерении температуры металла в образцах, залитых в стаканчики типа изображённого на рисунке 6,а. Практика показала, что, в то время как обычные стаканчики позволяют получать воспроизводимые результаты контроля температуры начала кристаллизации первичного аустенита, их геометрия и условия охлаждения не позволяют получать воспроизводимых результатов контроля микроструктуры чугуна. Как известно, температура металла при ТА определяется балансом между двумя тепловыми про-

цессами – выделением тепла при его остывании и отводом тепла через стенки стаканчика и открытую поверхность металла. Для обычных стаканчиков не удаётся практически создать воспроизводимых условий теплоотвода из-за различий в начальной температуре металла в стаканчике, скорости и количества наполнения стаканчика, захвате различного количества кислорода из атмосферы при заполнении стаканчика, температуры и разнотолщинности стенок стаканчика, температуры и скорости движения воздуха в месте контроля. Кроме того, стартовая комнатная температура стаканчика приводит к ускоренному охлаждению расплава, что приводит к "маскированию" характеристических температур на кристаллизационных кривых. Таким образом возникла задача спроектировать отборник проб для ТА, который бы исключал указанные недостатки стандартных стаканчиков. В результате решения этой задачи ф. SinterCast разработана погружная капсула для ТА, изображённая на рисунке 6,б.



а) Обычный стаканчик для образцов ТА



б) Погружная капсула SinterCast для ТА

**Рис. 6** Стандартный и новый пробоотборники для ТА

Образец для ТА получают в такой капсуле при её погружении в расплав в течение приблизительно двух секунд. Этот метод отбора минимизирует окисление и одновременно предварительно прогревает пробоотборник, чтобы обеспечить воспроизводимые условия охлаждения и кристаллизации расплава в капсуле. Сферическая геометрия капсулы обеспечивает равномерный теплоотвод от центра образца. Вакуумный барьер внутри двойной стальной стенки капсулы обеспечивает изоляцию типа Дьюара и медленное охлаждение чугуна. Верхняя часть пробоотборника также обеспечивает искусственный тепловой барьер для уменьшения и стабилизации радиационных потерь от открытой поверхности образца. Указанные конструктивные особенности способствуют однородному концентрическому поведению застывания. С целью получения большей информации для термического анализа в капсуле располагается двойная термопара, один измерительный спай которой располагается в тепловом центре образца, а второй – у основания защитной трубки термопары.

Как было сказано выше, основная проблема, связанная с надежным серийным производством ЧВГ, состоит в том, чтобы одновременно избежать формирования и ПГ, и ШГ. На сложных отливках технологическое окно ЧВГ может достигать диапазона 0-10% ШГ. Такая ситуация требует высокой точности ТА. Для увеличения точности ТА разработана система моделирования влияния исчезновения магния на микроструктуру в модифицированном чугуне. Моделирование достигается покрытием стенки у основания капсулы специальным реактивным материалом, который забирает активный магний из чугуна (рисунок 7).

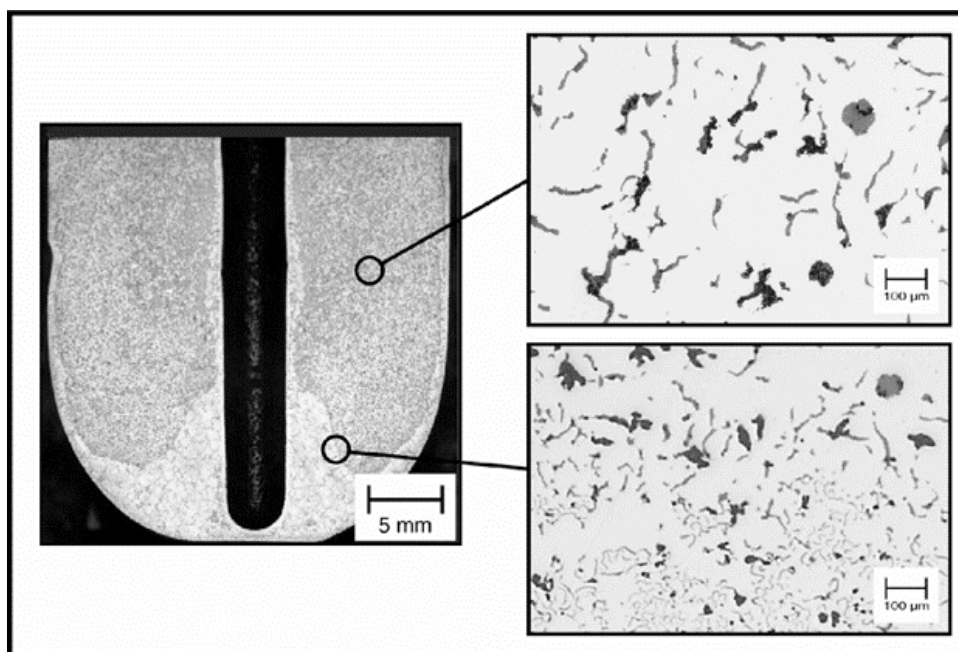


Рис. 7. Моделирование влияния исчезновения магния в чугуна

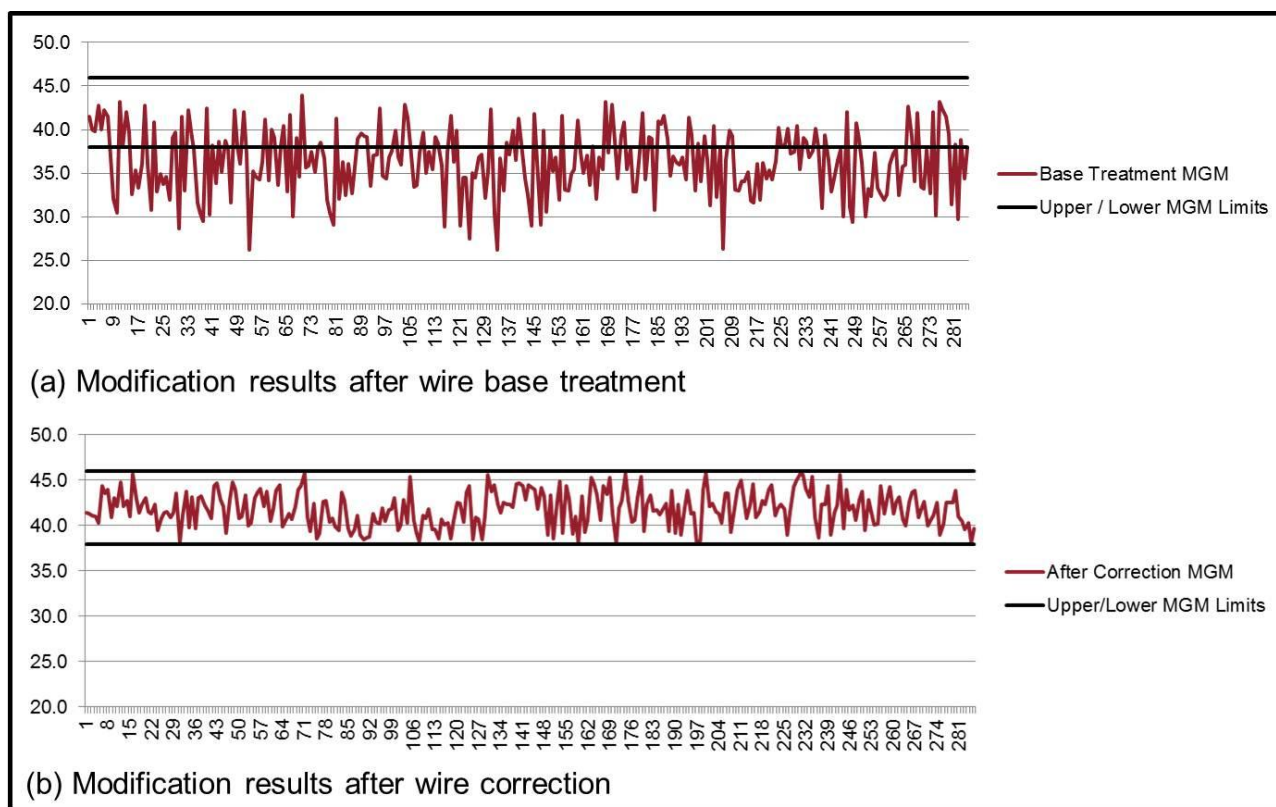
В результате в одной пробе созданы условия для локального анализа кристаллизации чугуна с разницей содержания магния порядка 0,003% (центр образца моделирует начальное состояние расплава, основание образца – состояние расплава примерно через 15 минут от начала). В показанном на рисунке 7 примере в поперечном сечении образца потеря активного магния в нижней части образца привела к формированию переохлаждённого ПГ D-типа. Присутствие ПГ определено кристаллизационной кривой нижней термопары и сигнализирует о нахождении расплава в области риска получения в структуре отливок недопустимого графита и низких механических свойствах чугуна.

На основе результатов исследования разработана технология стабильного получения вермикулярного графита в отливках массового производства. Технология включает предварительное модифицирование и инокулирование базового печного расплава любым традиционным методом. Это может быть сэндвич-процесс, обработка проволокой или другой, принятый в имеющемся производстве. 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 магния и инокулятора в расплаве. Поскольку обычное количество корректировки магния составляет порядка 35 г/ тонну расплава, то не требуется дополнительного удаления шлака и ковш сразу же после окончания добавки проволоки подаётся на разливку. Время на ТА и корректировку расплава как правило не превышает 4 минут.

На рисунке 8 показан пример результатов применения разработанной технологии в производстве мощных блоков двигателя. В пример включен 281 серийно залитый ковш. Основное модифицирование осуществлялось добавлением проволоки с наполнителем в 2,3-тонный ковш на основе статистически оптимизированного расхода модификатора по результатам ТА методом SinterCast предыдущих ковшей и в зависимости от содержания серы в базовом расплаве, веса и температуры металла в ковше. Производственные условия требовали содержание ШГ в ЧВГ в пределах 0...20%, предел прочности на растяжение не менее 380 МПа и никакой пористости, что, как было выявлено опытным путём, требовало дополнительного ограничения прочности не выше 460 МПа. Как видно на рисунке 8а, базовое модифицирование привело к получению прочности чугуна в недопустимо широком диапазоне от 260 МПа до 440 МПа – больше чем в два раза превышающем требуемый. Поэтому, даже если бы для достижения минимального уровня требуемой прочности на всех ковшах расход модификаторов был бы просто увеличен на постоянную величину, то большое количество ков-



шей оказалось бы "перемодифицированным" и забракованным. На рисунке 8б показаны результаты применения дополнительной корректировки модифицирования по методу SinterCast, которая привела к попаданию в требования спецификации всех 281 ковшей.



**Рис. 8.** Результаты применения метода SinterCast в серийном производстве 281ковша ЧВГ.

#### Заключение

В связи с возрастающими сложностью геометрии и требований к отливкам из ЧВГ технологи литейного производства должны надёжно управлять процессом их изготовления, гарантируя стабильное и прибыльное производство. Для осуществления этой задачи предлагается новая философия управления формированием высокой доли вермикулярного графита в ЧВГ, основанная на применении вместо традиционного контроля химического состав базового чугуна системы термического анализа SinterCast, включающего новый подход к контролю кристаллизационных кривых и использование результатов контроля для управления процессом модифицирования.

#### Литература

1. Детали машиностроения из чугуна с вермикулярным графитом: свойства, технология, контроль: тезисы докладов МНТК, (Набережные Челны, 17–18 октября 2017 г.) / под ред. А.Г. Панова. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2017. – 97 с.
2. 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).
3. Гуртовой Д.А., Панов А.Г., Закиров Э.С. Формирование вермикулярного графита в чугуне при переменном содержании серы в расплаве // М: Литейное производство, 2016, №5. – С. 2-3
4. Панов А.Г. Стабильное модифицирование высокопрочных чугунов. Метод, модификаторы, технологии // LAP LAMBERT Academic Publishing. – Saarbrucken, Deutschland, 2013. – 342 с.
5. Панов, Гуртовой ЛП2018\_3\_
6. Шерман, А.Д. Чугун: справочное издание / под ред. А.Д. Шермана и А.А. Жукова. – М.: Металлургия, 1991. – 576 с.
7. Исследовательский центр Модификатор [Электронный ресурс]: Решение МНТК ЧВГ. URL: [http://www.modificator.ru/about/2017\\_conference\\_review.html](http://www.modificator.ru/about/2017_conference_review.html) (дата обращения 17.01.2018).
8. Информационный ресурс по литейному производству [Электронный ресурс]: Использо-

вание термического анализа для контроля процесса получения ВЧ. Автор: Адриан Удрю, главный инженер завода ANSELMI, Компосампьеро, Италия. URL: <http://otlivka.info/wp-content/uploads/2017/04/file52.pdf> (дата обращения 07.01.2018).