

ОПЫТ НАДЕЖНОГО КРУПНОСЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ОТЛИВОК ИЗ ЧВГ

Доусон С.¹, Панов А.Г.^{2,3}, Гумеров И.Ф.^{2,4}, Панфилов Э.В.⁴, Гуртовой Д.А.^{2,4}, Аникин С.А.⁵
¹SinterCast, Швеция, ²НЧИ КФУ, ³ИЦМ, ⁴КАМАЗ, г. Набережные Челны, ⁵AVL, Австрия

Аннотация

В статье представлены результаты анализа развития промышленного производства отливок из ЧВГ. Показано, что высокие мировые темпы роста производства в последние 20 лет серийных отливок из ЧВГ обусловлены с одной стороны спросом на его уникальные технологические и эксплуатационные свойства применительно к широкому спектру компонентов, а с другой стороны – появлением промышленного процесса "измерять-и-исправлять", основанного на высокоточном термическом анализе качества модифицирования расплава и обеспечивающего узкие требования спецификаций по микроструктуре и свойствам ЧВГ.

Ключевые слова

ЧВГ, отливка, серийная технология, SinterCast

Summary

Results of the analysis of development of industrial production of castings from CGI are presented in article. It is shown that high world growth rates of production in the last 20 years of serial castings from CGI are caused on the one hand by demand for its unique technological and operational properties in relation to a wide range of components, and on the other hand – by emergence of industrial process "to measure-and-correct", based on the high-precision thermal analysis of quality of melts and providing narrow requirements of specifications for a microstructure and properties of CGI.

Keywords

CGI, casting, series technology, SinterCast

Опыт промышленного применения ЧВГ в машиностроении

Многие литейщики чугуна знают, что заявка на первый патент по высокопрочному чугуну с шаровидным графитом (ЧШГ) была подана Китом Миллисом в 1948 году и что патент по ней был выдан в 1949 году [1]. Гораздо менее известно, что в те же даты Миллис подал заявку и получил по ней патент и на чугун с вермикулярным графитом (ЧВГ) [2]. Несмотря на то, что пути ЧШГ и ЧВГ начались практически одновременно, развитие последнего происходило гораздо медленнее. Информация по производственной практике получения ЧВГ в мировой печати стала появляться лишь в 1970-е годы, мировое промышленное производство ЧВГ оставалось незначительным вплоть до начала 2000-х [3], а в России по оценке авторов до сих пор не превышает 1% от объема производимых чугунных отливок¹. Главная причина резкого отставания в развитии ЧВГ относительно ЧШГ состояла в том, что стабильно получать в микроструктуре чугуна высокую долю вермикулярного графита (ВГ) аналогичными для получения шаровидного графита (ШГ) методами модифицирования химическими элементами оказалось крайне сложно из-за значительно более узких требуемых диапазонов содержания этих элементов в расплаве перед кристаллизацией (значительно более узкого так называемого "технологического окна" [5]).

Указанную проблему в последние два десятилетия удалось преодолеть благодаря резкому развитию и внедрению в технологию литейного производства измерительной и компь-

¹ Годовой объем отечественного производства отливок из ЧВГ ~ 4 тыс. т ПАО КАМАЗ [4], ~ 2 тыс. т ПАО АВТОВАЗ и ~ 0,3 тыс. т ОАО "Транспневматика" при общем объеме чугунных отливок ~ 900 тыс. т.

ютерной техники, в результате чего ЧВГ в мировой производственной практике уже стал обычным машиностроительным материалом [6]. С высокой механической прочностью и хорошей теплопроводностью ЧВГ идеально подходит для компонентов, которые подвергаются одновременной тепловой и механической нагрузке, в частности, таких как блоки и головки блоков цилиндров (БЦ и ГБЦ) двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Первое серийное производство БЦ из ЧВГ для 3.3-литрового восьмицилиндрового V-образного дизельного двигателя фирма Audi запустила в 1999 году на литейном заводе Halberg Guss в Германии. С тех пор ЧВГ стал быстро распространяться в качестве основного материала для БЦ дизельных и бензиновых ДВС легковых автомобилей, а также для БЦ и ГБЦ дизельных двигателей коммерческих автомобилей. По оценке специалистов, в 2018 году в мире будет произведено более 1,5 миллиона блоков и головок блоков цилиндров из более 250 тыс. т высококачественного ЧВГ.

Как известно, ВГ в плоскости микрошлифа выглядит как отдельные червеобразные частицы (рисунок 1,а). Так же, как и в сером чугуна (СЧ) с пластинчатым графитом (ПГ), они вытянуты и случайным образом ориентированы, что обеспечивает хорошую теплопроводность и демпфирующую способность. Однако они короче и более толстые с закруглёнными краями. Исследование с помощью сканирующей электронной микроскопии глубоко протравленных микрошлифов ЧВГ показывает, что отдельные "черви" связаны с их самыми близкими соседями (рисунок 1,б). Такая монолитная кораллоподобная морфология наряду с округленными краями и "шероховатой" поверхностью частиц приводит к более сильной чем у ПГ адгезии между графитом и матрицей чугуна, осложняет зарождение и распространение в нём трещин, что является причиной превосходства механических свойств ЧВГ по сравнению с СЧ.

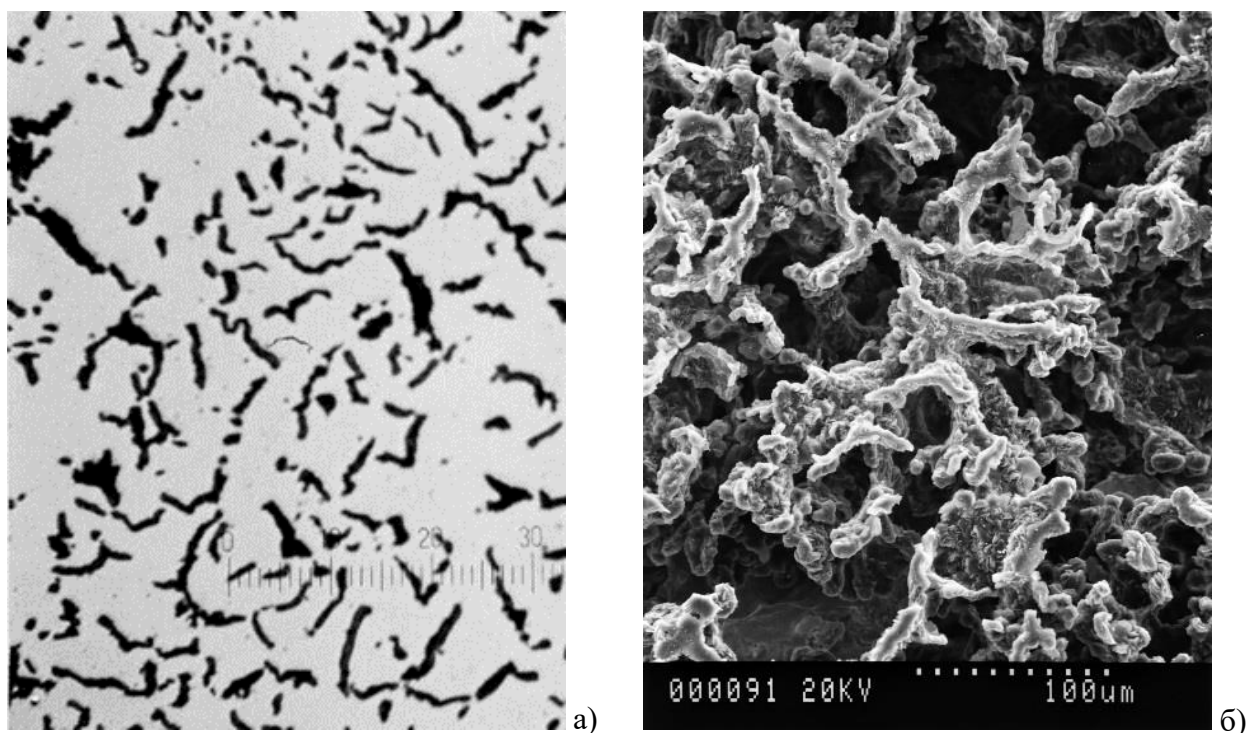


Рис. 1. Микроструктура ЧВГ: а) оптическая микроскопия, $\times 100$, не травлено, б) сканирующая электронная микроскопия, глубокое травление

В связи с ростом требований по повышению удельной мощности, топливной экономичности, надежности и долговечности, а также резкого ужесточения норм по выбросам вредных веществ с отработавшими газами ДВС конструкторам требуются более прочные функциональные материалы. ЧВГ обеспечивает по крайней мере на 75% более высокую

прочность на растяжение и на 50% более высокую жесткость в сравнении с обычными СЧ и алюминиевыми сплавами. Что еще более важно, ЧВГ при повышенных температурах обеспечивает по сравнению с СЧ двойную усталостную прочность и пятикратную по сравнению с алюминиевыми сплавами. В новых проектах эти свойства позволяют инженерам-конструкторам уменьшать размер и вес при увеличении рабочих характеристик двигателя. Для ранее разработанных конструкций двигателей ЧВГ могут обеспечить отсутствие эксплуатационных отказов при увеличенных рабочих нагрузках и существенно улучшить характеристики двигателя. Уже имеется положительный опыт промышленной эксплуатации БЦ одинаковых размеров, но форсированных версий из ЧВГ и обычных версий из СЧ, изготавливаемых в одних условиях литейного производства [4].

Согласно большинству международных стандартов, есть пять марок ЧВГ с минимальной прочностью на растяжение от 300 МПа до 500 МПа с шагом в 50 МПа. Минимальную прочность от 300 МПа имеют полностью ферритные ЧВГ, промышленно применяемые для таких компонентов, как корпуса турбин турбокомпрессоров и выпускные коллекторы. 400-я и 450-я марки – преимущественно перлитные и широко используются для блоков и головок блоков цилиндров. За последние двадцать лет большинство автопроизводителей в мире сошлись на едином комплексе технических требований к чугунам для сложных по конфигурации блоков и головок блоков цилиндров:

- доля ШГ 0-20% для исключения негерметичности и оптимальных теплопроводности, демпфирующей способности и механической обрабатываемости;
- полное исключение пластинчатого графита, резко снижающего механические свойства ЧВГ;
- перлита >90% для обеспечения высокой прочности и износостойкости на стабильном уровне;
- содержание титана $\leq 0,02\%$ для оптимальной механической обрабатываемости.

Промышленный опыт эксплуатации ДВС с БЦ и ГБЦ из ЧВГ показал, что увеличенная прочность и жесткость ЧВГ позволяет при переходе с серого чугуна снизить вес компонентов на 10-20%, на 5-10% уменьшить габариты двигателя, на 20-30% увеличить мощность двигателя, на 0,5-1,5 дБ снизить шум его работы и на 20-30% увеличить ресурс рабочей поверхности цилиндров двигателя, выполнить существующие и перспективные мировые требования по токсичности отработавших газов.

Первоначально проекты ЧВГ касались только новых программ модернизации ДВС, где конструктор имел полную свободу для максимального сокращения веса и габаритов изделия. Однако, начиная приблизительно с начала последнего десятилетия 20 века, несколько производителей модернизировали существующие конструкции двигателей с повышением мощности за счёт применения ЧВГ. Примеры современных серийных отливок из ЧВГ представлены на рисунках 2-7. Наиболее жесткие требования к эффективности и надежности работы двигателей предъявляются к двигателям коммерческих автомобилей. Ещё до введения норм Euro-4 в 2005 году производитель коммерческих автомобилей DAF Trucks стал первым автопроизводителем, который массово применил ЧВГ для блоков и головок блоков цилиндров в конструкции 12-литрового двигателя XE 390. С тех пор, особенно с вводом норм Euro-5 в 2010 году и Euro-6 в 2015 году, и, как следствие, увеличением максимального давления сгорания с 200 до 240 атм., многие автопроизводители приняли ЧВГ в качестве основного материала для БЦ и ГБЦ. Следующее поколение дизельных двигателей в настоящее время разрабатывается с максимальным давлением сгорания 280 атм., позволяя 12-литровым двигателям обеспечить те же рабочие характеристики как у 15-литровых двигателей предыдущего поколения. В настоящее время ЧВГ стал стандартным материалом для обеспечения долговечности двигателей коммерческих автомобилей ведущих автопроизводителей Европы, Америки, Азии (таблица 1) и, безусловно, является перспективным для России и СНГ как стандартный материал серийного производства.



Рис. 2. Интегрированный выпускной коллектор и корпус турбокомпрессора двигателя легкового автомобиля (~5 кг, ЧВГ300, благодарность: BorgWarner)



Рис. 3. БЦ 2.7 литрового V6 бензинового двигателя Ford с опорами коренных подшипников, изготовленными по разрывной технологии (~50 кг, ЧВГ 400, благодарность: Ford Motor Company)

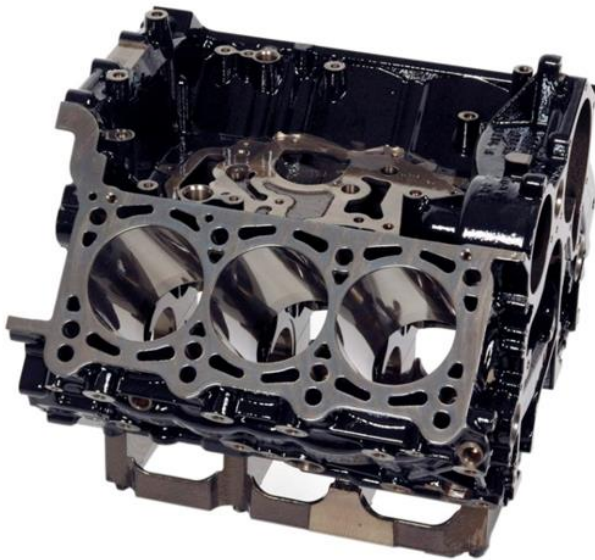


Рис. 4. БЦ дизельного ДВС Audi 3.0 литра V6 (~70 кг, ЧВГ 400, благодарность: Audi)

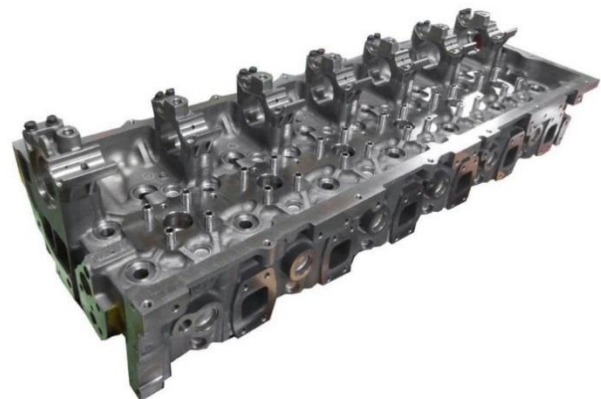


Рис. 5. ГБЦ ДВС 6,3 литрового двигателя Hyundai (~100 кг, ЧВГ 400, благодарность: Hyundai)



Рис 6. БЦ 13 литрового двигателя Scania (~300 кг, ЧВГ 450, благодарность: Scania)



Рис. 7. ГБЦ тепловозного двигателя General Electric (~175 кг, благодарность: General Electric)

В мировом транспортном машиностроении в настоящее время ЧВГ используется многими производителями, включая Caterpillar (ГБЦ двигатели серий С175, 3500 и 3600), Cummins (ГБЦ двигателей серии QSK), Doosan (БЦ V12), , General Electric (БЦ тепловозные двигатели V12 и V16), John Deere (гильзы БЦ 9.0-литровых ДВС), Liebherr (БЦ ДВС V8 и V12), MAN (БЦ ДВС V12), и MTU (ГБЦ двигателей серии 2000) и т.д. Кроме того, ЧВГ широко используется Federal Mogul для производства поршневых колец диаметром 200-980 мм.

Спрос на отливки из ЧВГ серийного производства в России в последние годы так же постоянно растёт в различных сферах его применения. В частности, в ПАО КАМАЗ весной 2017 года принята программа расширения номенклатуры производимых из ЧВГ компонентов, в ОАО "Транспневматика" в 2016 году начато производство тормозных дисков для электропоездов "Ласточка" из ЧВГ, ряд стеклотарных производителей осваивает серийное производство кокилей из ЧВГ.

Таблица 1.

Применение ЧВГ для двигателей коммерческих автомобилей различными производителями

Производитель	Применение ЧВГ
DAF Trucks	БЦ и ГБЦ для двигателей 10.8 и 12.9 литров
Ford-Otosan	БЦ и ГБЦ для двигателя 9.0 литров и ГБЦ для двигателя 13 литров
Hyundai	БЦ для двигателей 3.9 и 6.3 литра ГБЦ для двигателей 6.3, 10.0 и 12.7 литров
Iveco	ГБЦ для ДВС 16 литров
Navistar	БЦ для ДВС 13 литров
MAN	БЦ для ДВС 10.5 и 12.4 литра
Mercedes	ГБЦ для ДВС 10.6, 12.8, 14.8 и 15.6 литров
Scania	БЦ для 13-литрового рядного ДВС и 16-литрового V8 ДВС
Sinotruk	БЦ для ДВС 12.4 литра

Опыт управления процессом получения ЧВГ

Метод управления процессом получения ЧВГ зависит от серийности производства, сложности отливок и жесткости требований к микроструктуре. Относительно простые отливки низкой серийности могут производиться с традиционным управлением химическим составом и хорошей дисциплиной литейного производства. Однако при увеличении сложности и серийности отливок возникает потребность обеспечить минимальную себестоимость отливок за счёт максимального выхода годного, т.е. минимальной дефектности и литниково-питающих систем. Предельный случай таких требований возникает для производства блоков цилиндров и головок блоков цилиндров коммерческих двигателей и двигателей легковых автомобилей. Для этих компонентов серийность производства, тоннажи и геометрическая сложность высоки и постоянно возрастают, а допуск риска дефектности многих производителей стремится к нулю, поэтому для их производства требуется максимально стабильная технология, обеспечивающая жесткие требования спецификаций к микроструктуре.

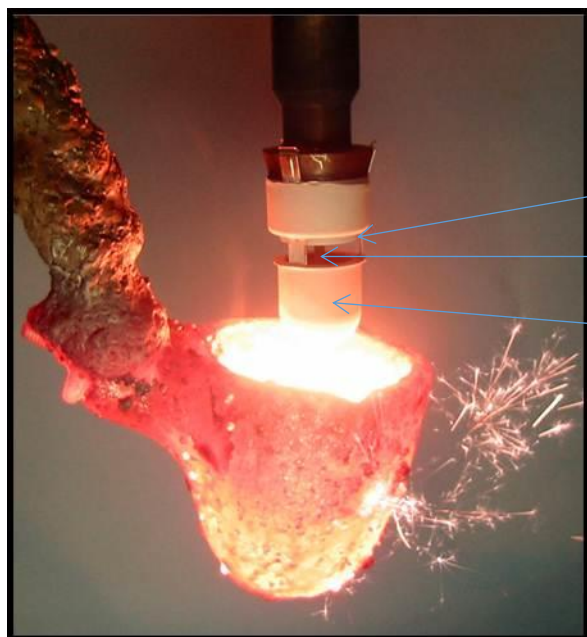
За 70 лет развития технологий производства ЧШГ и ЧВГ было разработано много способов модифицирования чугуна, направленных на стабильное получение определённой формы компактного графита в промышленных отливках [7]. Большинство этих способов основывались на управлении содержанием магния и/или редкоземельных элементов, которые существенно изменяют форму частиц графита. Однако для ЧВГ оказалось одинаково важным управлять также добавлением инокуляторов (графитизирующих модификаторов), которые определяют количество зародышей графита. Когда в расплаве увеличивается количество

рассредоточенных зародышей графита, не всем из них хватает строительного углеродного материала для соединения в "кораллы графита". Часть из них при кристаллизации в литейной форме имеет тенденцию роста до малых по размеру шариков, остающихся изолированными, что сопровождается относительно низкой теплопроводностью, низким предвсудочным расширением и приводит к повышенной пористости отливок. Чтобы остаться в узких пределах 0-20% сферичности (nodularity, т.е. содержания шаровидного графита в микроструктуре ЧВГ), необходимо управлять сфероидизирующим модификатором и инокулятором одновременно с равным акцентом на оба параметра.

Как известно, получение ШГ и ВГ в чугуна сопряжено с рядом трудностей, обусловленных явлением структурной наследственности, то есть с конкретными условиями литейного производства [5,7]. В производственном процессе всегда присутствуют такие случайные и зачастую не контролируемые с достаточной точностью факторы, как содержание всех поверхностно-активных элементов и, прежде всего, кислорода, конкретный состав, расход и усвоение модификаторов, зависящих от условий производства и хранения модификаторов, колебаний температуры расплава, скорости наполнения ковша, расположения модификатора в ковше, веса металла в ковше, температуры ковша и другие. Поэтому для обеспечения надёжного результата в такой ситуации необходим либо тотальный контроль всех операций и материалов, либо объективный контроль качества расплава максимально близко к заливке форм с возможностью в случае необходимости надёжной корректировки его качества. Первый путь в современных условиях отечественного литейного производства практически невозможен, прежде всего, в связи с проблемой нестабильности качества и отсутствия надёжного контроля качества сложных по составу и строению сфероидизирующих (вермикуляризирующих) модификаторов [7] без инвестиций в разработку требований к качеству модификаторов ЧВГ в виде нормативной документации и системы сертификации модификаторов [8]. В то же время, на современном этапе производства ЧВГ в последние двадцать лет в мире активно развивается второе направление. Максимальное распространение среди производителей высококачественного ЧВГ в мире получила технология, основанная на оценке качества расплава с помощью термического анализа и последующей доводки его до нужной кондиции простым по составу модификатором в небольшом количестве, так называемый *процесс SinterCast* [3].

Применение контроля качества чугунного расплава методом термического анализа известно достаточно давно. Однако в отечественном литейном производстве он практически не применяется. Одной из причин такой ситуации является большая погрешность результатов контроля традиционным методом. По традиционному методу (например, [9]) контроль проводят, измеряя температуру кристаллизующегося чугуна одноразовой термопарой, вмонтированной в песчаный прямоугольный стаканчик, в который ложкой или ковшом заливают исследуемый расплав. При этом большой случайный разброс имеют следующие теплофизические условия процесса контроля: соотношение масс пробы и стаканчика (уровень заливаемого металла), начальные температуры теплового процесса (расплава, дна и стенок стаканчика), скорости теплоотвода от стенок стаканчика и от зеркала металла, сложная геометрия фронта кристаллизации из-за неравномерности тепловых потоков от стенок и дна стаканчика. Кроме того, металл в традиционном методе приобретает случайную окисленность от различного времени и удельной поверхности контакта с атмосферой воздуха при его транспортировке и заполнении им стаканчика, что для ЧВГ является существенным фактором. Все эти недостатки устранены в методе *SinterCast* благодаря специально разработанному пробоотборнику [3], в стаканчик которого в течение 2-х секунд методом погружения без случайного окисления заливается гарантированное количество расплава весом 200 грамм. Пробоотборник имеет защитный экран, стабилизирующий теплоотвод от зеркала расплава. Сфериче-

ское дно стаканчика обеспечивает однородный фронт кристаллизации. Камерное исполнение с внутренним воздушным зазором объединённых по конструкции стенки и дна стаканчика в комплексе с двухзонной (центр и дно стаканчика) термопары приводит к более точному измерению кристаллизационных параметров из-за исключения ускоренного охлаждения в момент кристаллизации. Отбор пробы (рисунок 8) осуществляется на стенде, имеющем экраны от цеховых воздушных потоков. Эти преимущества дизайна – основной элемент точности процесса SinterCast, требуемой для получения ЧВГ, имеющего "узкое технологическое окно", когда важно, чтобы все измеренные параметры кристаллизации были определены качеством расплава, а не случайными условиями отбора пробы и проведения измерений.



Экран теплоотвода

Многоразовая двухзонная термопара

Стальной однокамерный окрашенный стаканчик со сферическим дном

Рис.8. Отбор пробы для термического анализа по методу SinterCast погружением стаканчика в глубину расплава, обеспечивающий максимальную точность параметров кристаллизации.

Технологический процесс по методу SinterCast начинается с предварительной сфероидизирующей и инокулирующей обработки чугунного расплава любым известным методом, в том числе традиционным для конкретного литейного производства, но с одной особенностью. Обработка осуществляется на статистически определённый в условиях рассматриваемого производства нижний уровень сфероидизации чугуна, то есть с минимальным расходом (обычно в ~ 1,5 раза ниже традиционного) для возможности последующей точной корректировки. После этого на стенде (стационарном или мобильном в зависимости от условий производства) с помощью термического анализа контролируют качество модифицирования с автоматической аналитической обработкой результатов контроля и подачей управляющих сигналов на трайб-аппарат для ввода в расплав необходимого количества корректирующих модификатора и инокулятора. В качестве модификатора используется проволока с низким содержанием магния, как правило, содержащая 12 грамм магния в одном метре. Во время стандартного серийного производства среднее добавление магния на заключительном шаге корректировки составляет ~35 грамм на тонну расплава. Заливку форм можно осуществлять сразу же после корректировки без каких-либо остановок, в том числе для скачивания шлака или отбора пробы. Отбор проб для контроля механических свойств и химического состава согласно спецификаций после корректировки требуется осуществлять только во время настройки технологии, а также периодически, например, при использовании новой бухты модификатора, начале смены и т.п. Весь процесс измерять-и-исправлять онлайн требует приблизительно четырех минут и проводится параллельно со стандартной деятельностью литейного завода, в том числе удалением шлака и транспортировкой ковшей.

На рисунке 9 в качестве примера представлены фактические данные по универсальному показателю степени модифицирования чугуна MGM^2 , полученные в серийном производстве отливок блоков цилиндров из ЧВГ по методу SinterCast на 281 ковше ёмкостью 2,3 т. Основное модифицирование проводилось с помощью проволоки на основе статистически оптимизированных зависимостей от результатов SinterCast предыдущих ковшей, содержания серы в базовом расплаве, а также веса и температуры металла в ковше. Требуемые для условий рассматриваемого производства диапазоны MGM-эквивалента от 38 до 46, обеспечивающие требования спецификации (сферичность 0-20%, $\sigma_B > 450$ МПа, герметичность) были предварительно установлены соответствующими исследованиями. Как показано на рисунке 9,а, после стандартного основного предварительного модифицирования и инокулирования MGM-эквивалент имел значения от 26 до 44 – более чем в два раза шире, чем допустимый диапазон. После корректировки по методу SinterCast значения MGM-эквивалента всех 281 ковшей попали в требуемый диапазон. Во время серийного производства каждый ковш получил уникальную корректировку магнием и инокулятором, чтобы достичь требуемого качества расплава.

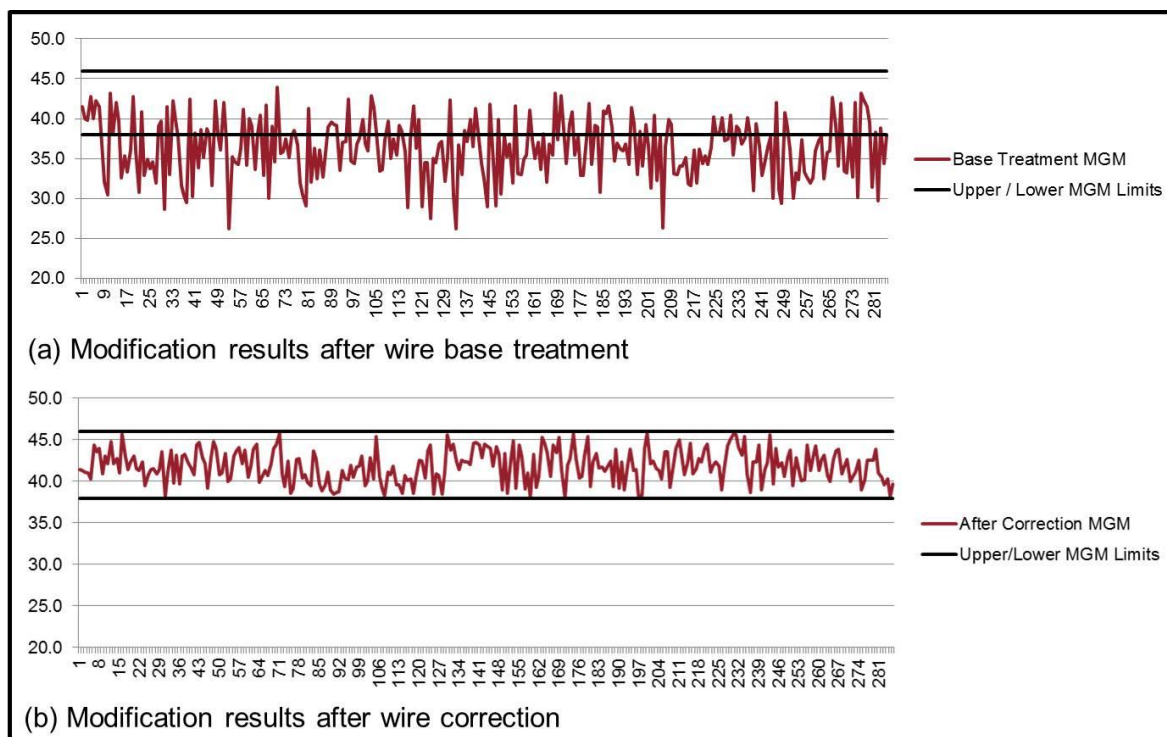


Рис.9. Требуемый уровень и ковшевые результаты контроля MGM-эквивалента (универсального показателя качества модифицирования ЧВГ) 281 ковши серийного производства отливок БЦ по методу SinterCast: а) после предварительной обработки, б) после корректировки.

Надёжное управление процессом повышает эффективность литейного производства и уменьшает риски отказов автопроизводителей. При отсутствии надежного управления процессом уменьшается производительность литейного производства, увеличивается расход энергоносителей, материалов, выбросов CO_2 , шлаковых и формовочных отходов производ-

² MGM (Measurement Grade Modification) – специально разработанный SinterCast безразмерный параметр, рассчитываемый аналитической программой по результатам термического анализа, который, имея значения от 0 до 100 по оси степени модифицированности расплава, определяет соответствующую микроструктуру на также специально разработанной шкале микроструктур модифицирования и инокулирования ШМ [3]. Для ВГ > 80% MGM должен находиться в диапазоне 38...46.

ства. Для современных БЦ и ГБЦ с продажной ценой ~2.00 евро за килограмм сокращение каждого процента брака или улучшение на один процент коэффициента использования металла (сокращение литниково-питающей системы) может дать экономический эффект ~20 евро на тонну литья. Учитывая это обстоятельство, на сегодняшний день на процесс SinterCast полагаются 44 чугунолитейных лицензиата из 13 стран во всем мире, которые ежегодно по нему из ЧВГ производят более двух миллионов отливок, в том числе более миллиона блоков цилиндров двигателей внутреннего сгорания.

Резюме

Начиная с первого серийного производства из ЧВГ отливок блоков цилиндров в 1999 году, мировой объём производства блоков и головок блоков цилиндров из ЧВГ ежегодно растёт более, чем на 20% и, как ожидают автопроизводители, в 2018 году превысит 1,5 миллиона отливок. Высокие темпы роста серийных отливок из ЧВГ в мировом литейном производстве обусловлены с одной стороны спросом на его уникальные технологические и эксплуатационные свойства применительно к широкому спектру компонентов: блоков цилиндров бензиновых и дизельных двигателей пассажирских транспортных средств; рядных и V-типа блоков и головок блоков цилиндров коммерческих автомобилей; различных промышленных силовых установок от двигателей малой авиации до больших морских судов и других. С другой стороны резкое развитие обусловлено появлением в последние два десятилетия промышленного процесса SinterCast "измерять-и-исправлять", основанном на высокоточном термическом анализе качества модифицирования расплава и обеспечивающего узкие требования спецификаций по микроструктуре и свойствам ЧВГ, что открывает новые возможности и для отечественного литейного производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 2485760 USA, CAST FERROUS ALLOY / Millis K., Gagnebin A., Pilling N., 1949.
2. Пат. 2485761 USA, GRAY CAST IRON HAVING IMPROVED PROPERTIES / Millis K., Gagnebin A., Pilling N., 1949.
3. Доусон С., Панов А.Г., Гуртовой Д.А., Технология стабильного получения вермикулярного графита в отливках массового производства // М: Литейное производство, 2018, №4. – С. 7-11.
4. Панфилов Э.В. О перспективах производства литья из ЧВГ на ЛЗ ПАО КАМАЗ // М: Литейное производство, 2018, №2. – С. 2-5.
5. 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.
6. Доусон С. Особенности структуры ЧВГ и свойства, определяющие перспективы его применения в машиностроении // Тезисы докладов международной научно-технической конференции «Детали машиностроения из чугуна с вермикулярным графитом. Свойства. Технология. Контроль». – 2017. – с. 12-13.
7. Панов А.Г. Стабильное модифицирование высокопрочных чугунов. Метод, модификаторы, технологии // LAP LAMBERT Academic Publishing. – Saarbrücken, Deutschland, 2013. – 342 с.
8. Иванова В.А., Панов А.Г. О создании системы добровольной сертификации модификаторов // М: Сертификация, 2013, № 4. – С. 21-25.
9. Thermal Analysis of Cast Iron // Информационный материал ф. Heraeus Electro-Nite https://www.heraeus.com/media/media/hen/media_hen/products_hen/iron/thermal_analysis_of_iron.pdf