

Эффективный способ производства чугунов с вермикулярным графитом (ЧВГ).

(С.М. Ecob and C. Hartung. Elkem ASA Research, P.O. Box 8040, Vaagsbygd, NO – 4675 Kristiansand, S. Norway, Tel. + 47 38 01 70 00, Fax. + 47 38 01 74 94)

АННОТАЦИЯ

В статье приведен обзор основных свойств чугуна, которые производители ожидают получить в отливках из ЧВГ и которые по своим значениям занимают промежуточное положение между свойствами серых и высокопрочных чугунов. Кроме того, в статье описаны два общепринятых в настоящее время способа производства ЧВГ, а именно: обработка расплава заниженным количеством магния и обработка расплава магнием и титаном. В последнем случае сначала формируются зародыши для кристаллизации шаровидного графита, а затем рост глобулей графита подавляется с целью формирования включений графита компактной формы (вермикулярного графита). Рассмотрены преимущества и недостатки этих методов, дано сравнение традиционных способов с новым процессом получения ЧВГ, для которого был разработан специальный модификатор, пользующийся всё большим спросом на современном рынке литья. Новый процесс обработки на ЧВГ обеспечивает более широкое «технологическое окно» и не имеет ряда недостатков, например, таких как: накапливание титана в возврате.

Помимо этого, в статье рассмотрены факторы, которые необходимо учитывать при производстве ЧВГ, а именно: химический состав базового чугуна, уровень содержания кислорода в чугуне, графитизирующее модифицирование и предварительная подготовка расплава.

ВВЕДЕНИЕ

Процесс ужесточения экологических требований к двигателям, происходящий во многих странах (особенно в странах ЕС), привел к тому, что многие производители используют новые подходы при создании и конструировании легковых и грузовых автомобилей. К 2008 году среднее количество выбросов угарного газа, приходящихся на одну машину, должно быть снижено с 180 гр/км до 140 гр/км, а среднее потребление топлива – с 7 л/100 км до 5 л/100 км.

Это означает, что, для выработки повышенного количества энергии с каждого литра топлива, оно должно сжигаться более эффективно. Это неизбежно ведет к тому, что процесс сгорания топлива в двигателях должен происходить при повышенных температурах и, следовательно, двигатели должны обладать повышенными термической стабильностью и прочностью.

Одним из решений, позволяющих решить проблему ужесточения экологических требований, является увеличение доли машин, оснащенных дизельными двигателями с турбонаддувом.

Применение серого чугуна и алюминия при производстве двигателей не позволяет получать отливки, удовлетворяющие новым требованиям. Использование алюминия ограничено по причине его малой термической стабильности, а серого чугуна – из-за прочностных характеристик и показателей теплопроводности.

Чугун с вермикулярным (компактным) графитом (ЧВГ) позволяет получать желаемые механические и физические свойства при условии, что исторически сложившиеся трудности производства отливок из ЧВГ будут устранены (особенно по такому показателю как чувствительность к толщине стенки отливки).

Чугун с вермикулярным графитом известен уже много лет. Однако только с недавних пор он стал серьезно рассматриваться как высокотехнологичный материал.

На протяжении многих лет ЧВГ с успехом применяется при производстве чугунных изложниц, шлакоуловителей, сифонов и сифонных плит, но все эти отливки имеют толстые сечения и простую конфигурацию, что не идет ни в какое сравнение с дизайном автомобильного литья, что и явилось одной из главных причин медленного внедрения ЧВГ в машиностроении.

К настоящему времени из ЧВГ уже производятся блоки цилиндров, в том числе большие отливки для дизельных двигателей, однако, число автомобильных отливок из ЧВГ, выпускающихся крупносерийными партиями, было несопоставимо мало по сравнению с автомобильным литьем из СЧ и ВЧ. Наиболее

популярными отливками из ЧВГ были выхлопные коллекторы. Однако сегодня использование данного материала постепенно становится более популярным при производстве тормозных дисков и барабанов, головок блоков цилиндров, различных компонентов гидравлических систем и даже поршневых колец. Большинство фирм-производителей автомобильного литья уже либо производят часть своих отливок из ЧВГ, либо разрабатывают технологию их производства.

Перечисленные выше отливки традиционно изготавливаются из СЧ, однако, наиболее подходящими предприятиями для производства отливок из ЧВГ являются те, на которых производится ВЧ, так как на таких предприятиях гораздо легче достигнуть низкого уровня содержания серы в базовом чугуне.

До сих пор основными методами производства ЧВГ являлись:

- ввод в расплав недостаточной для полной сфероидизации графита навески модификатора типа ФСМг
- ухудшение степени сфероидизации графита за счет ввода в расплав титана.

Однако данные способы имели опасно «узкие» технологические возможности, что могло приводить к нежелательному накоплению титана в возврате.

В данной статье описываются положительные свойства ЧВГ, которые с успехом находят своё применение в отливках различной сложности и рекомендуется третий способ производства отливок из ЧВГ, который накладывает меньше ограничений на процесс производства, что делает его более гибким и стабильным.

СВОЙСТВА ЧВГ

Свойства ВЧ определяются сформировавшейся матрицей, тогда как свойства СЧ зависят от формы и размеров включений пластинчатого графита. Эти показатели оказывают влияние, в частности, на такие свойства как пластичность высокопрочных и теплопроводность серых чугунов. Вермикулярная форма графита обеспечивает получение свойств, которые занимают промежуточное положение между серыми и высокопрочными чугунами. Пример этому – теплопроводность, как это показано на Рисунке 1.

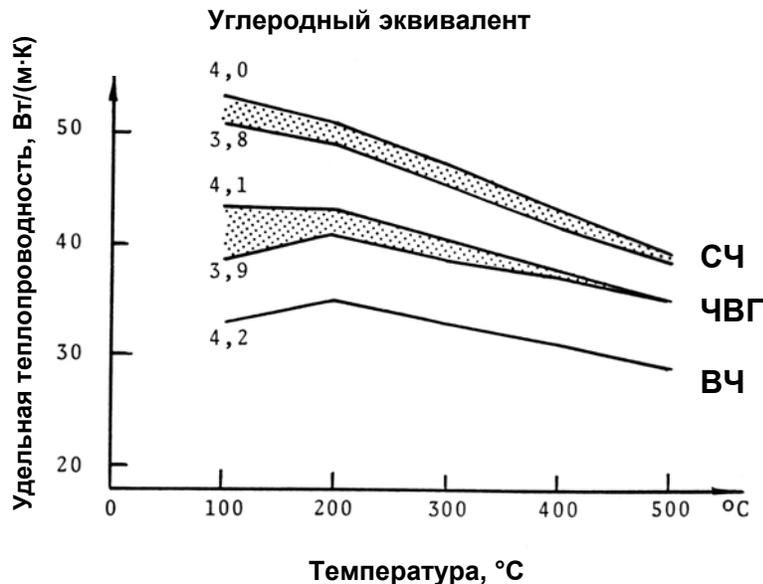


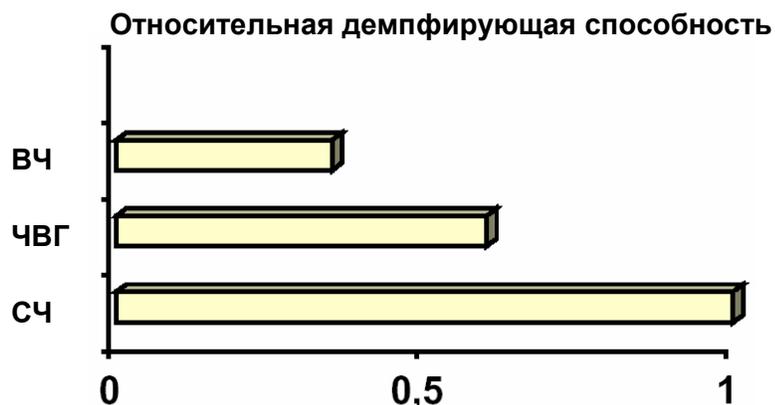
Рисунок 1: Сравнение теплопроводность СЧ, ЧВГ и ВЧ как функции рабочей температуры отливки [1]

ЧВГ обладает более высокой прочностью по сравнению с СЧ, что позволяет производить отливки с более тонкими сечениями. Этот факт частично объясняет почему большинство отливок, производимых в настоящее время из ЧВГ, пришло из тех отраслей, где традиционно использовался СЧ. Общее представление о механических свойствах, которые можно получить в отливках из ЧВГ в сравнении с СЧ и ВЧ, отражено в Таблице 1.

Таблица 1: Сравнение механических свойств серых, высокопрочных и чугунов с вермикулярным графитом.

	Матрица	Прочность [МПа]	Твердость [НВ]	Относительное удлинение [%]
СЧ				
	Перлитная	200 – 270	175 – 230	0 – 1
ЧВГ	Ферритная	330 – 410	130 – 190	5 – 10
	Перлитная	420 – 580	200 – 250	2 – 5
ВЧ	Ферритная	400 – 600	140 – 200	15 – 25
	Перлитная	600 – 700	240 – 300	3 – 10

Относительная демпфирующая способность серого, вермикулярного и высокопрочного чугунов представлена на Рисунке 2.

**Рисунок 2: Сравнение относительной демпфирующей способности СЧ, ВЧ и ЧВГ.**

ПРОБЛЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА ОТЛИВОК ИЗ ЧВГ

Основной проблемой получения чугуна с вермикулярным графитом удовлетворительного качества остается проблема чувствительности структуры к толщине сечения отливки. Большинство литейных заводов производят оценку структуры отливок с помощью имеющихся в наличии стандартных образцов для испытаний, однако, в случае с ЧВГ это вряд ли поможет оценить реальные свойства чугуна в отливке. Это, к сожалению, происходит потому, что если структура стандартного образца и состоит на 100 % из графита компактной формы, то более тонкие сечения в реальной отливке могут содержать некоторое количество шаровидного графита, а в толстых сечениях можно обнаружить пластинчатый графит. Поэтому, очень важно использовать образец, отображающий реальные перепады сечений отливки и проводить его заливку максимально идентично заливке форм, о чём часто забывают в реальных условиях литейных производств.

На Рисунке 3 приведено несколько примеров микроструктур, содержащих различное количество шаровидного графита. Эффект увеличения тенденции к образованию шаровидного графита в микроструктуре приведен на Рисунках 4, 5 и 6. Далее приводятся некоторые соображения в части факторов, влияющих на форму графита в процессе формирования отливки.

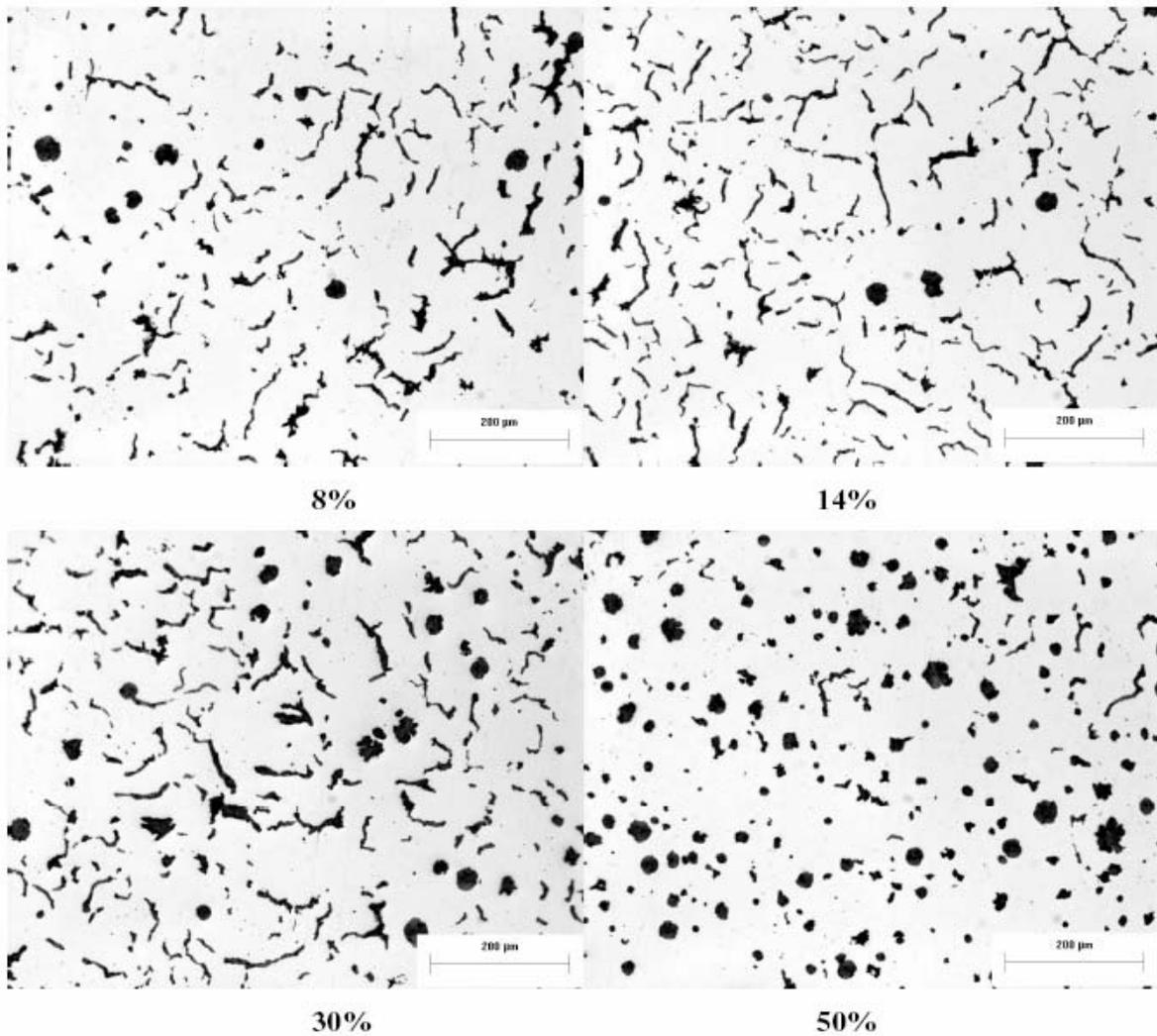


Рисунок 3: Примеры различных содержаний структур шаровидного графита в ЧВГ.



Рисунок 4: Влияние увеличения степени шаровидности графита на некоторые свойства ЧВГ.

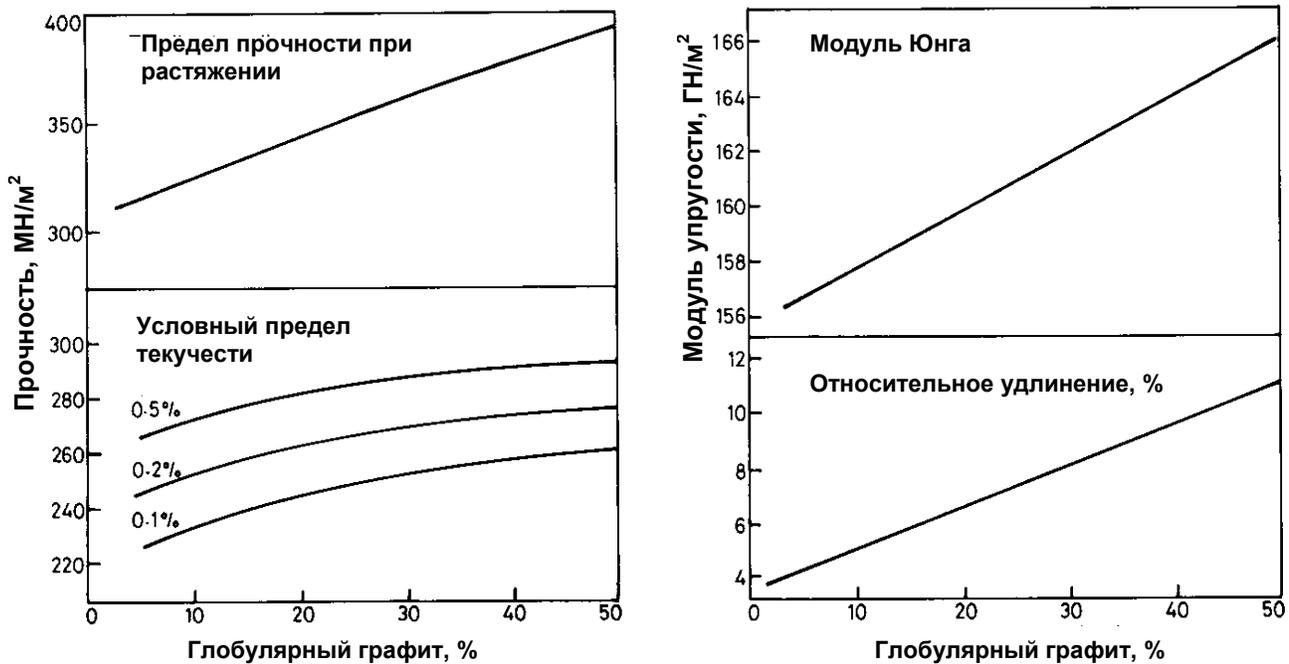


Рисунок 5: Эффект влияния степени шаровидности графита на механические свойства ЧВГ. [2]

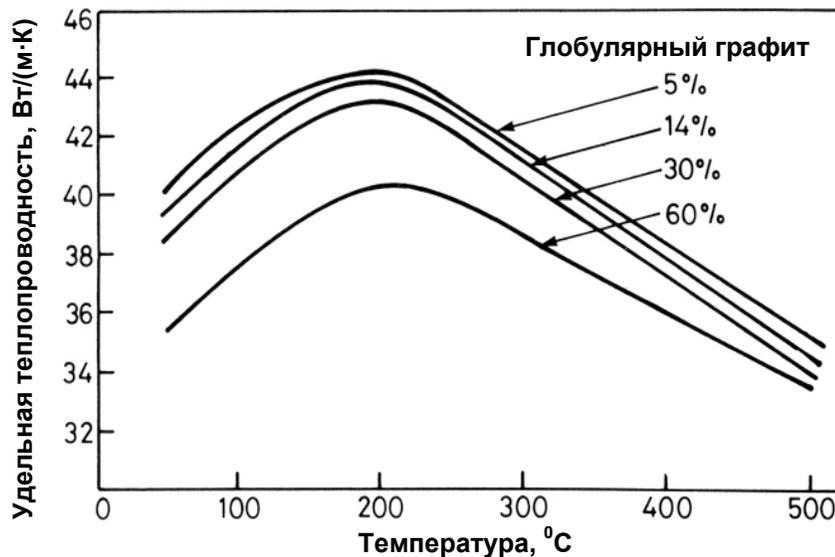


Рисунок 6: Эффект влияния степени шаровидности графита на теплопроводность ЧВГ для различных рабочих температур. [2]

Другая проблема, возникающая при производстве ЧВГ – нехватка международных стандартов.

Сегодняшние производители отливок из ЧВГ и те компании, что только начинают внедрение этого процесса используют на практике наиболее популярный в наши дни способ оценки, а именно: по процентному содержанию шаровидного графита в матрице, подразумевая, что пластинчатый графит в матрице отсутствует. В настоящее время Международная Организация по Стандартизации (ISO) создает новый стандарт, который будет использоваться для сертификации продукции и в котором структура будет классифицирована по степени шаровидности графита.

Идея классифицировать материал по нежелательной характеристике, которой и является степень шаровидности графита, кажется на первый взгляд странной, однако так как все механические и физические свойства были привязаны к этой характеристике, то и было принято решение создать стандарт на основе данного показателя.

В стандарте будут представлены 5 марок ЧВГ со следующими показателями:

- предел прочности на растяжение от 300 до 500 Н/мм²
- относительное удлинение от 2.5 до 0.5 %

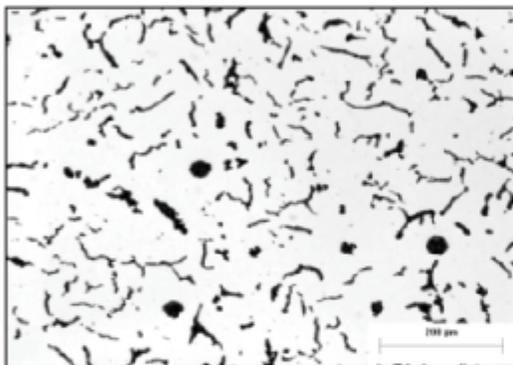
Концентрируя внимание на шаровидном графите, другие параметры (такие как: форма, распределение и толщина включений вермикулярного графита) практически не принимаются во внимание при классификации марок ЧВГ. Однако перечисленные выше параметры оказывают заметное влияние на термические и механические свойства.

Компания Элкем разработала специальную программу, использующую технику анализа фотографий микроструктур. С помощью данной программы можно оценить степень компактности графита в полученной отливке. Пример отчета, полученного с использованием программы, приведен на Рисунке 7. Независимо от того, какой метод используется для классификации структуры ЧВГ, нужно помнить о необходимости визуального контроля всех измерений квалифицированным персоналом, так на сегодняшний момент не существует абсолютно надежного метода анализа структуры только по фотографиям (имеется вероятность того, что включения графита нежелательной формы (взорванный, пластинчатый графит и т.д.) будут ошибочно приняты машиной как вермикулярные).

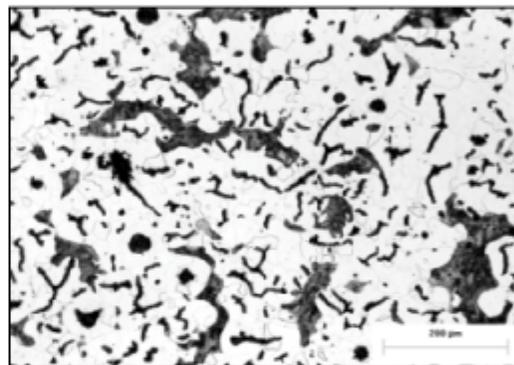
Sample description 35B2

ER Ref.No: 174-01

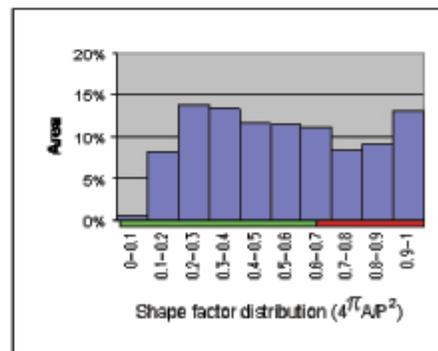
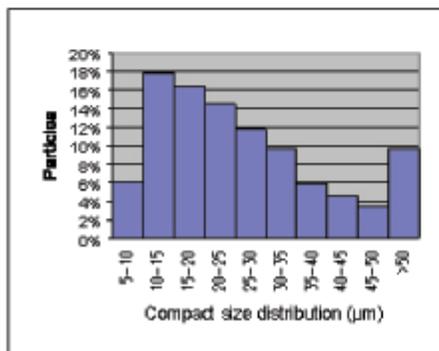
CGI	Total area (mm ²)	No. of particles counted	No. of compacts /mm ²	Compactness (%)	Graphite (%)	Ferrite (%)	Pearlite (%)	Compact size _{0.1} (µm)	Shape _v 4 \sqrt{A} / d ²
d _{0.1} >= 5µm	4.9	2028	266	84	8	75	17	27.3	0.4
Graphite particles/mm ²		414		Ferrite+Pearlite=100:		82	18		



Micrograph showing typical graphite structure in the sample (polished condition)



Micrograph showing typical microstructure in the sample (etched in Nital)



Kristiansand 30.11.01

Approved:

 A. H. Amundsen

 R. Gundersen

Рисунок 7: Пример отчета о микроструктуре, разработанного для отливок из ЧВГ.

ТРАДИЦИОННЫЕ СПОСОБЫ ПРОИЗВОДСТВА ЧВГ

Отливки из ЧВГ могут быть произведены любым из нескольких существующих в настоящее время методов обработки. Наиболее распространённые способы:

- обработка расплава искусственно заниженной навеской ФСМг или магния (по сравнению с аналогичным процессом обработки на ВЧ) и
- обработка расплава магнием и титаном, в результате которой формируются зародыши для формирования графита шаровидной формы, а затем рост шаровидных включений графита подавляется, формируя тем самым графит компактной формы.

Теоретически возможна обработка расплава церием или азотом, однако авторам не известен ни один литейный завод в мире, производящий отливки из ЧВГ в промышленных масштабах с применением этих способов, поэтому в данной статье они не рассматриваются.

Обработка расплава искусственно заниженной навеской ФСМг или магния:

Обычные марки ВЧ имеют остаточное содержание магния на уровне 0.025 – 0.06 %, в зависимости от толщины сечений и типа производимых отливок. Для отливок из ЧВГ остаточное содержание магния, как правило, находится в диапазоне 0.01-0.03 % и при производстве таких отливок можно использовать стандартные марки ФСМг. Однако, это довольно неудобный процесс с точки зрения предсказуемости и контроля за остаточным содержанием магния (посредством которого и обеспечивается получение заданных структур компактного графита). Слишком высокое остаточное содержание магния ведет к формированию избыточного количества шаровидного графита, тогда как малое остаточное содержание магния ведет к формированию структур серого чугуна, особенно в толстых сечениях. В отливках сложной конфигурации (с наличием большого количества перепадов по толщине сечений), этот процесс фактически невозможно контролировать, поэтому данный метод не нашел широкого применения при производстве сложных отливок. Процесс получения требуемых структур осложняется ещё больше при использовании металлического магния, особенно в случаях применения проволоки с магниевым наполнителем, что часто приводит к необходимости дополнительных дорогостоящих обработок.

Обработка магнием и титаном:

Процесс обработки идентичен получению ВЧ, что подразумевает использование магния. Отличием является только дополнительный ввод в расплав титана (в виде ферротитана или составе модификатора типа ФСМг с титаном). Типичное остаточное содержание титана составляет 0.08 – 0.12 %. Этот метод более технологичен по сравнению с предыдущим и удовлетворительные структуры ЧВГ могут быть получены как в тонких, так и в более толстых сечениях отливки.

Однако, главным недостатком этого способа, помимо сравнительно высокой стоимости обработки расплава, является исключительно плохая механическая обрабатываемость отливок. Другим немаловажным недостатком является потенциальная опасность загрязнения возврата титаном, что исключает его применение как при производстве СЧ для избежания формирования графита типа «D», т.е. структур переохлажденного графита, так и высокопрочных чугунов.

Известные методы производства ЧВГ представлены на Рисунке 8.



Рисунок 8: Различные способы производства отливок из ЧВГ.

ПРОИЗВОДСТВО ЧВГ ПОСРЕДСТВОМ МОДИФИКАТОРА СОМПАСТМАГ™ КОМПАНИИ «ЭЛКЕМ»

Компания «Элкем» разработала новый модификатор для производства ЧВГ, который не содержит отрицательно воздействующих на микроструктуру элементов (таких как, например, титан) и при этом обеспечивает высокую технологичность процесса в составе любого литейного производства.

Модификатор СОМПАСТМАГ™ производится на основе ФС45 и содержит 5-6 % магния и 5.5-6.5 % РЗМ. Как было отмечено в предыдущем разделе, присутствие в модификаторе магния является общим для двух описанных выше методов получения ЧВГ, а исследования, проведенные компанией «Элкем», показали, что РЗМ оказывают положительное воздействие на чувствительность микроструктуры к толщине сечения отливки, минимизируя различия структур в тонких и толстых сечениях. Помимо этого, высокое содержание РЗМ в модификаторе позволяет легко контролировать процесс обработки по сравнению с обычным ФСМг или магнием, что обеспечивает получение заданных степеней усвоения элементов из модификатора.

Сегодняшняя практика использования СОМПАСТМАГ™ на ведущих литейных предприятиях за рубежом показывает, что хорошие структуры ЧВГ можно получать при навеске в 0.3-0.4 % вес, причём, как при ковшевых обработках, так и при внутриформенном модифицировании. Применение модификатора СОМПАСТМАГ™ позволяет получить существенную экономию за счёт снижения стоимости обработки. Так, при обработке расплава магнием и титаном навеска представленных на рынке обычных марок ФСМг может составлять порядка 1-2 %. Используя альтернативный вариант заниженной навески ФСМг (без применения титана), этот показатель составляет в среднем 0.5-1.0 % вес. И хотя экономика процессов существенно варьируется применительно к условиям различных литейных предприятий, пример сравнительной стоимости обработки базового чугуна на ЧВГ, представленный на Рисунке 9, может говорить сам за себя.

Вариант обработки 1	Стоимость, \$	Вариант обработки 2	Стоимость, \$
1,3 % MgFeSi	13,00	0,35 % СОМПАСТМАГ™	5,00
0,25 % FeTi	6,00	-	0,00
0,3 % графитизатор	5,00	0,2 % графитизатор	3,00
Итого:	24,00	Итого:	8,00

Рисунок 9: Сравнение стоимости обработки чугуна различными методами.

На Рисунке 10 приведены примеры микроструктур, полученных с использованием навески 0.35 % стандартного модификатора типа ФСМг (6%Mg, 1% PЗМ) и модификатора СОМПАСТМАГ™. Из фотографий микроструктур видно, что сечение отливки толщиной 5 мм, полученной с использованием стандартного ФСМг, в основном содержит графит шаровидной (глобулярной) формы, в то время как микроструктура сечения толщиной 35 мм той же самой отливки представляет собой, главным образом, структуру серого чугуна. Навеска же модификатора СОМПАСТМАГ™ в объеме 0.35 %вес обеспечивает формирование преимущественно графита компактной формы в обоих сечениях, хотя неизбежно большее количество глобулярного графита обнаруживается в сечении толщиной 5 мм. Данный факт подтверждает низкую технологичность обработки расплава заниженной навеской магния посредством стандартных марок ФСМг.

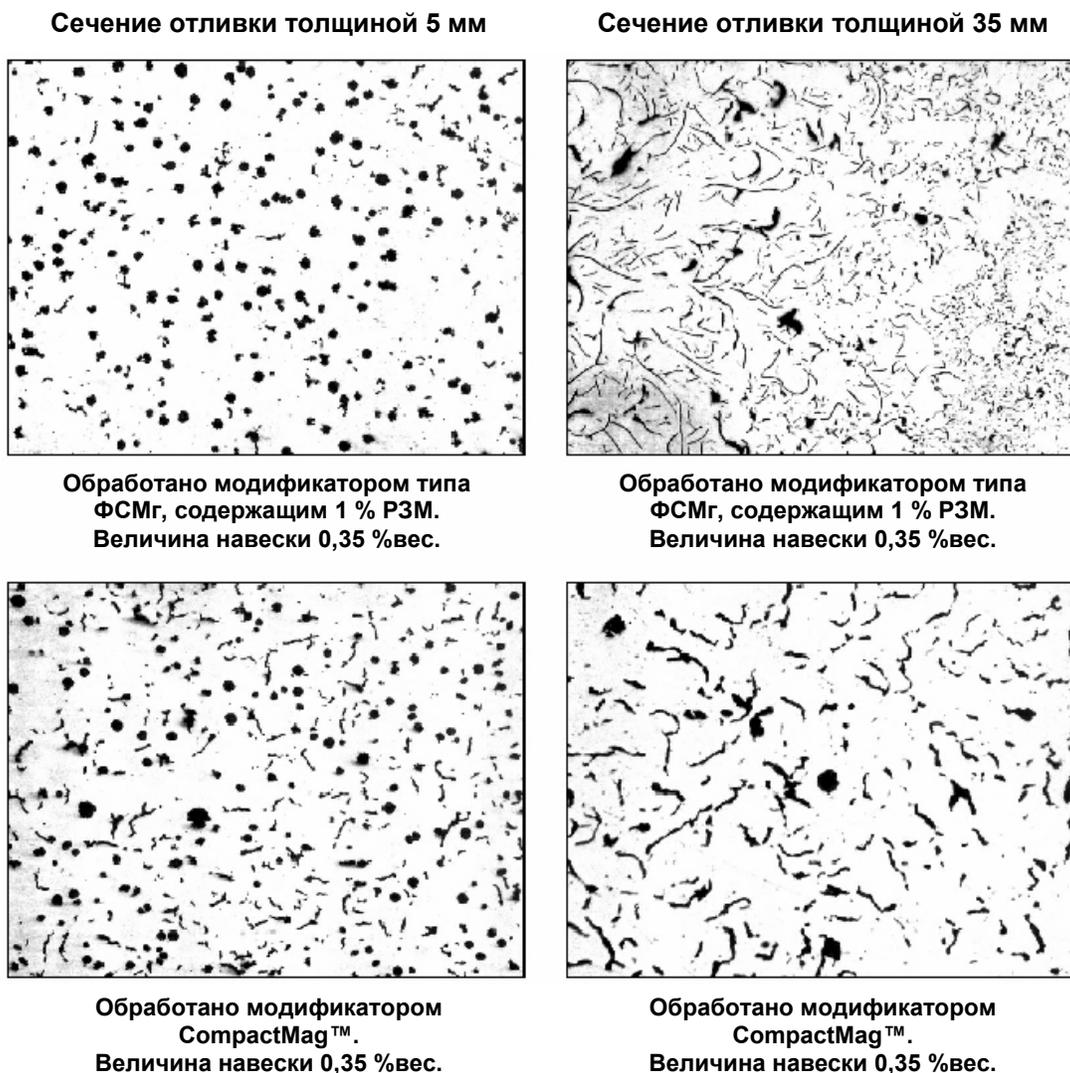


Рисунок 10: Пример сравнения метода обработки расплава заниженным количеством магния из ФСМг и модификатором СОМПАСТМАГ™.

Свойство	СЧ (ISO 100)	ЧВГ (обработано ФСМг и титаном)	ЧВГ (обработано модификатором СОМПАСТМАГ™)	ВЧ (ISO 400-12)
Предел текучести, МПа	-	290	330	250 min.
Предел прочности на разрыв, МПа	100 min.	365	380	400 min.
Относительное удлинение, %	~ 0.5	4.5	5	15 min.

Рисунок 11: Сравнение свойств СЧ, ВЧ и ЧВГ, полученного двумя способами обработки расплава: «магний + титан» и модификатором СОМПАСТМАГ™.

На Рисунке 11 приведено сравнение свойств отливок, полученных на литейном заводе, который использовал два способа обработки расплава: $\text{ФСМг} + \text{Ti}$ и модификатор **СОМПАСТМАГ™**. В первом случае навески составляли 1.3 % ФСМг и 0.5 % FeTi , а при втором варианте использовали только навеску 0.35 % модификатора **СОМПАСТМАГ™**. Обработку осуществляли в ковше «сэндвич» процессом.

Были отмечены лучшие значения предела текучести и предела прочности на разрыв. Кроме того, меньшая величина навески модификатора **СОМПАСТМАГ™** позволила не только получить значительную экономию себестоимости отливки за счет снижения затрат на модифицирование, но и способствовало формированию меньшего количества шлака (Рисунок 12).



Чугун обработан:

ФСМг с 1 % PЗМ – 1,50 %вес
 FeTi – 0,25 %вес

Чугун обработан:

Модификатором **CompactMag™** – 0,35 %вес

Рисунок 12: Шлак на поверхности металла в реакционном ковше после обработки.

Из приведенных примеров следует, что в настоящее время появился более эффективный и коммерчески приемлемый метод производства отливок из ЧВГ, обладающий рядом преимуществ по сравнению с «традиционными» способами, а именно:

- Исключение загрязнения возврата титаном;
- Возврат ЧВГ можно смешивать с возвратом ВЧ без отрицательных последствий;
- Малая навеска **СОМПАСТМАГ™** позволяет увеличивать содержание кремния (Si) в печи, что в свою очередь ведёт к увеличению срока службы футеровки;
- Формирование минимального количества шлака и дресса;
- Улучшается механическая обрабатываемость литья ввиду отсутствия твердых частиц карбидов и карбонитридов титана;
- Более низкие затраты на модифицирование;
- Большая гибкость процесса;
- Меньшая чувствительность к толщине сечения отливки;
- Отсутствие каких-либо лицензионных платежей при использовании модификатора **СОМПАСТМАГ™**.

ДРУГИЕ ВАЖНЫЕ ФАКТОРЫ

Помимо выбора модификатора и адекватного процесса обработки базового чугуна литейным предприятиям необходимо учитывать и некоторые другие факторы для обеспечения рентабельного производства отливок из ЧВГ высокого качества. К таким важным факторам относятся:

- состояние базового чугуна
- подготовка базового чугуна
- графитизирующее модифицирование

Перечисленные факторы напрямую влияют на величину отбела, склонность отливки к усадочным тенденциям, структуру и её чувствительность к толщине сечения отливки.

Химический состав чугуна:

Как и при производстве качественных отливок из ВЧ важным фактором достижения успеха в получении ЧВГ является предварительная подготовка базового металла к последующей обработке. Несомненно, процессы правильной первичной обработки расплава магнием и последующее графитизирующее модифицирование важны, но зачастую многие предприятия напрасно тратят модификаторы и время, пытаясь скорректировать чугун после завершения его обработки на ЧВГ, когда это можно делать перед модифицированием и разливкой по формам.

Говоря в целом, необходимо обрабатывать базовый металл следующего состава (хотя возможны различные отклонения от рекомендуемых параметров для чугунов специального назначения, например):

- 3.5-3.8 % углерод
- 1.9-2.5 % кремний (конечное содержание зависит от способа получения ЧВГ)
- 0.007-0.015 % сера
- 0.03 % макс. фосфор

Содержание других элементов менее важно, хотя, в целом, не должно значительно превышать пределы, установленные для высокопрочных чугунов. Говоря в целом, допустимо повышенное содержание перлит и карбид стабилизирующих элементов, если уровень серы в базовом чугуне достаточно низок, а навеска COMPACTMAG™ не превышает 0.40 %вес.

Критическим фактором при производстве ЧВГ является поддержание низкого уровня содержания серы в базовом чугуне. Избыточная сера будет реагировать с содержащимися в модификаторе магнием (Mg) и церием (Ce), что снизит эффект от Mg/PЗМ, следствием чего произойдет увеличение количества пластинчатого графита структуре. С другой стороны, если содержание серы очень мало, то металл, обработанный Mg/PЗМ, будет очень трудно откликаться на последующее графитизирующее модифицирование и будет склонен к формированию карбидов железа (отбелу), особенно в тонких сечениях.

После обработки состав чугуна должен находиться в следующих пределах:

- 3.3 – 3.6 % углерод
- 2.0 – 2.5 % кремний
- 0.005 – 0.012 % сера (наиболее оптимальный вариант)
- 0.003 – 0.015 % магний
- 0.005 – 0.015 % церий

Как правило, содержание магния и церия в чугуне после обработки расплава должно быть одинаковым. Так же рекомендуется поддерживать низкое содержание углерода и кремния, так как это обеспечит более качественное модифицирование, хотя и может потребоваться проведение вторичного графитизирующего модифицирования. Исследования показали, что количество шаровидных включений графита увеличивается с повышением содержания кремния и становится невозможным получение структур графита компактной формы требуемого качества.

На большинстве предприятий используют одинаковую шихту для получения ВЧ и ЧВГ. Однако следует отметить, что малые навески модификаторов COMPACTMAG™ и Foundrisil® Inoculant могут привести к тому, что потребуются ввод дополнительного количества кремния в базовую шихту.

Предварительная обработка и подготовка базового чугуна:

На некоторых предприятиях производится предварительная обработка базового чугуна для создания одинаковых условий перед каждым модифицированием. Такая предварительная обработка заключается в контролируемом вводе в чугун серы и/или кислорода.

Самые успешные литейные предприятия в настоящее время определяют содержание активного кислорода в базовом чугуне посредством анализаторов и поддерживают его на уровне 50-80 ppm от общего содержания кислорода. На основе такого анализа можно установить четкую взаимосвязь между качеством модифицирования на ЧВГ и уровнем содержания кислорода в базовом чугуне. Если базовое содержание кислорода ниже приведённого уровня, то в расплав необходимо ввести источник кислорода в виде соединения малой стабильности, чтобы вернуть уровень содержания кислорода в указанный диапазон. Наиболее популярным материалом производства компании «Элкем» для предварительной обработки чугуна является графитизирующий модификатор Ultraseed® Inoculant, который обеспечивает расплав кислородом и другими элементами, формирующими зародыши для последующей кристаллизации графита на этой важной

стадии процесса. Обычно, он вводится на струю металла при его переливе из печи в ковш с крышкой или любой другой ковш, где проводится основная обработка расплава. Однако необходимо проявлять осторожность, поскольку проведение предварительной обработки базового чугуна может способствовать формированию такого количества центров кристаллизации графита, которое сформирует избыточное количество глобулярного графита в структуре. Необходимо отметить, что при использовании Mg/PЗМ содержащего модификатора СОМПАСТМАГ™ реакция протекает спокойно по сравнению с рядовой обработкой ФСМг на ВЧ и серьезного отрицательного воздействия на сформировавшиеся потенциальные центры кристаллизации графита не наблюдается.

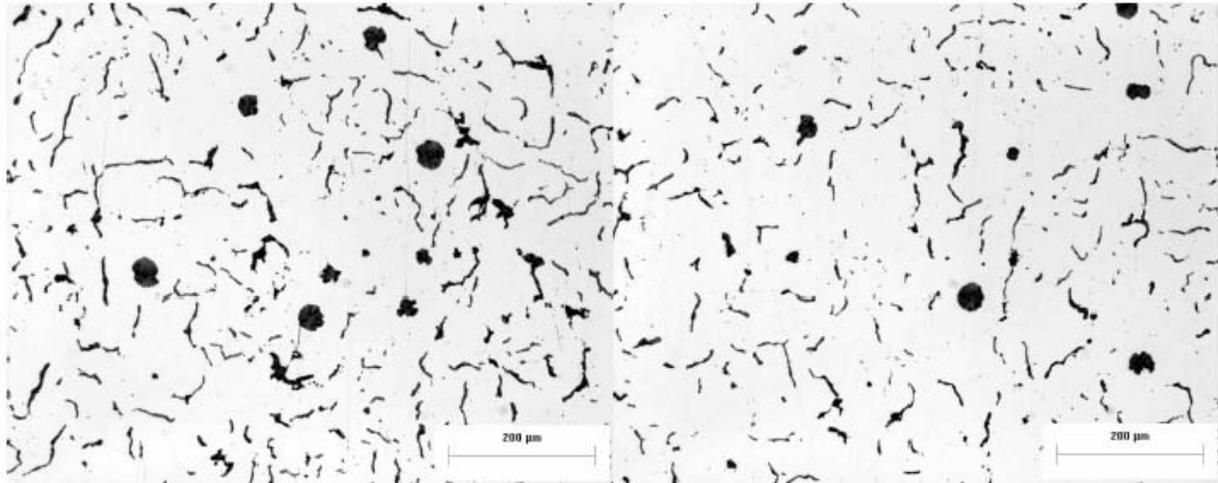
Содержание серы в базовом чугуне:

Содержание серы в базовом чугуне играет чрезвычайно важную роль при производстве ЧВГ. В последнее время наблюдается серьезный интерес традиционных производителей литья из серого чугуна к переходу на отливки из ЧВГ и это закономерно. Однако зачастую это требует изменений в образе мышления специалистов в части подхода к получению базовых чугунов требуемого состава.

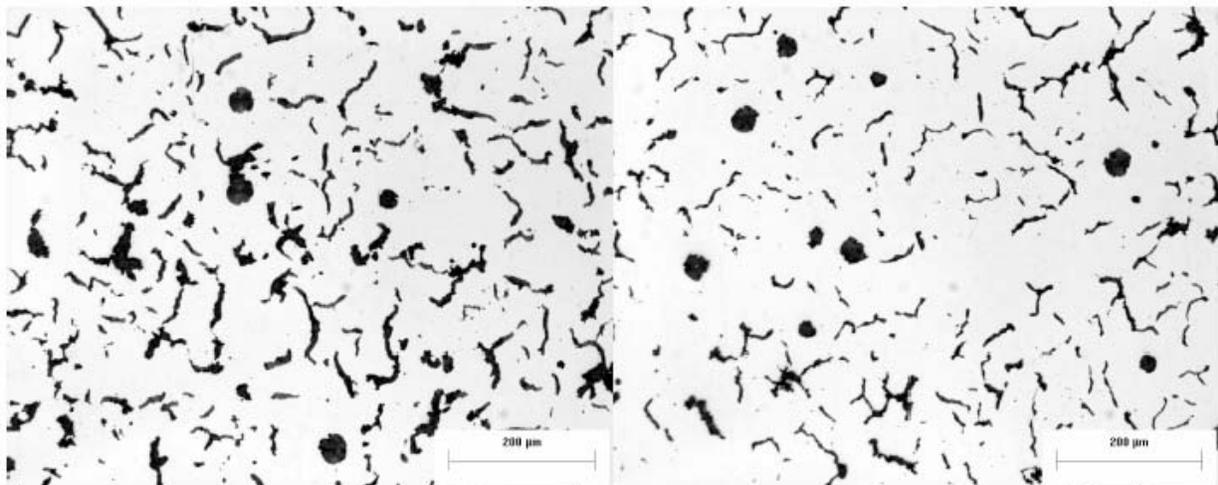
Содержание серы в базовом чугуне должно находиться в диапазоне 0.007 - 0.015 %. Говоря в целом, чем выше содержание серы в базовом металле, тем больше модификатора будет востребовано для десульфурации металла перед тем, как начнется собственно процесс формирования вермикулярного графита. Содержание серы в базовом чугуне становится особенно важным показателем, когда используются процессы обработки расплава Mg + Ti или малой навеской рядовых марок ФСМг, поскольку сами по себе процессы не являются технологичными.

Возможно получить ЧВГ хорошего качества и при уровне содержания серы в базовом чугуне на уровне 0.02%, но при этом процесс становится трудноконтролируемым, а результаты обработки – непредсказуемыми. В то время как при содержании серы в интервале 0.007 – 0.02 % существует линейная зависимость между содержанием серы и объемом навески модификатора СОМПАСТМАГ™, при содержании серы свыше 0.02 % такая зависимость становится экспоненциальной.

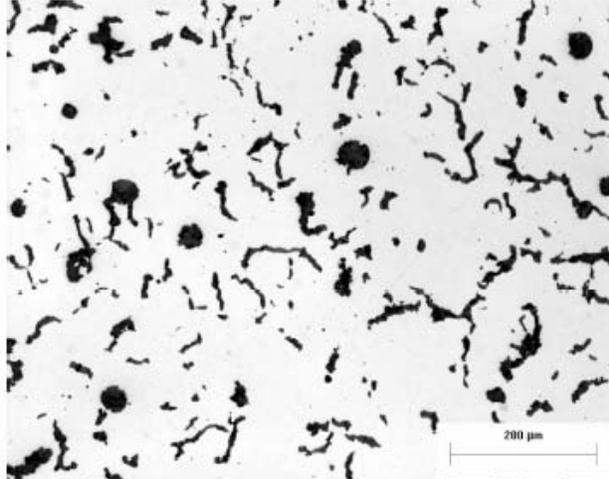
Так, на Рисунке 13 показано, что модификатор СОМПАСТМАГ™ обеспечивает получение структур ЧВГ удовлетворительного качества даже при повышенном содержании серы в базовом чугуне и при этом не требуется значительного увеличения навески модификатора.



а) Обработано навеской 0,3 %вес CompactMag™ б) Обработано навеской 0,35 %вес CompactMag™



в) Обработано навеской 0,35 %вес CompactMag™ г) Обработано навеской 0,4 %вес CompactMag™



д) Обработано навеской 0,45 %вес CompactMag™

Содержание серы в базовом
чугуне:

0.010 %вес S => а) и б)

0.015 %вес S => в) и г)

0.020 %вес S => д)

Рисунок 13: Микроструктуры ЧВГ, полученные при обработке чугунов с различным содержанием серы модификатором COMPACTMAG™.

Для минимизации количества шлака, формирующегося в процессе обработки на ЧВГ, для уменьшения вероятности возникновения отбела и для повышения управляемости процесса модифицирования в целом не рекомендуется использовать базовый чугун с содержанием серы выше 0,02 %.

Модификатор Foundrisil® Inoculant в качестве защитного покрытия при «сэндвич» процессе:

При производстве ВЧ на многих литейных заводах в качестве защитного покрытия модификатора в реакционных ковшах используют стальную высечку или чугунную стружку для задержки реакции магния с расплавом и повышения уровня металла в ковше перед началом реакции.

В результате экспериментов, проведенных Научно-исследовательским центром «Elkem Research» в Норвегии и испытаний в реальных условиях ряда литейных производств было обнаружено положительное воздействие на процесс обработки чугуна на ЧВГ графитизирующего модификатора средней эффективности в качестве защитного покрытия вместо стальной стружки. Установлено, что навеска в количестве 0.3 % вес. модификатора Foundrisil® inoculant в качестве защитного покрытия модификатора COMPACTMAG™ в реакционном ковше способствует уменьшению количества модификатора, необходимого для проведения вторичного графитизирующего модифицирования. Так же было обнаружено, что при стандартных условиях навеска 0.3 % Foundrisil® inoculant в качестве защитного покрытия уменьшает тенденцию к формированию отбела и более эффективно обеспечивает формирование компактного графита. Однако, в некоторых случаях, особенно для толстостенных отливок, потребность во вторичном графитизирующем модифицировании может быть полностью устранена.

Вторичное графитизирующее модифицирование:

При производстве ЧВГ серьезное внимание необходимо уделять и вопросу вторичного графитизирующего модифицирования. С одной стороны, присутствие в структуре карбидов железа крайне нежелательно, но с другой стороны графитизирующее модифицирование будет способствовать формированию включений графита шаровидной формы. Поэтому рекомендуется использовать графитизирующие модификаторы со средним эффектом воздействия. Практикой обнаружено, что при вторичном графитизирующем модифицировании ЧВГ модификаторы для серых чугунов (такие как Superseed® inoculant, например) работают эффективней чем графитизирующие модификатора для ВЧ. Как правило, величина навески графитизирующего модификатора при производстве ЧВГ занимает промежуточное значение между навесками для серых и высокопрочных чугунов и, в большинстве случаев, составляет порядка 0.1-0.5 % при ковшевой обработке и зависит, в основном, от температуры металла, эффекта «старения модифицирующего воздействия» и толщины сечений отливки. В большинстве случаев, при использовании правильного состава базового чугуна и графитизирующего модификатора в качестве материала защитного покрытия можно полностью отказаться от вторичной графитизирующей обработки, что особенно важно при реализации процесса внутриформенного модифицирования.

«Старение» модифицирующего эффекта и температура обработки:

В зависимости от типа отливки и способа литья расплав после обработки модификатором COMPACTMAG™ и с использованием защитного покрытия из Foundrisil® можно выдерживать от 5 до 20 мин без отрицательных последствий для микроструктуры. В результате многочисленных испытаний было так же отмечено, что температура обработки в интервале 1400 – 1520 °С так же не оказывает негативного воздействия на микроструктуру отливок. Однако для всех отливок необходимо помнить, что выбор модификатора для проведения вторичного графитизирующего модифицирования необходимо выбирать, основываясь на температуре заливки расплава.

PQ-CGI® – ТЕХНОЛОГИЯ КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА ОТЛИВОК ИЗ ЧВГ

Консорциум Elkem AS - NovaCast AB является уникальным поставщиком всего комплекса услуг (ноу-хау, материалы, программное обеспечение, техническая поддержка и т.д.) по производству отливок из ЧВГ.

Почему необходимо использовать систему контроля процесса производства?

Вермикулярная форма графита является промежуточной между шаровидной и пластинчатой. Требования, предъявляемые к контролю над процессом производства отливок из ЧВГ, очень жестки, так как необходимо принимать во внимание не только минимальный уровень содержания остаточного магния, но и максимальный. Как правило, колебания содержания остаточного магния не должны превышать $\pm 0.015\%$, что накладывает определенные трудности на процесс производства. Однако на то, в какой форме будет кристаллизоваться графит в результате обработки расплава, влияет не только содержание остаточного магния, но также металлургический статус базового чугуна (или, другими словами, качество базового чугуна). Особенно важны такие параметры, как: потенциал зародышеобразования, общий уровень окисленности расплава, содержание серы, азота и активный углеродный эквивалент (ACEL). Спектральный химический анализ чугуна недостаточен. Он только показывает количество каждого элемента, но не говорит ничего о металлургическом статусе чугуна. На Рисунке 14 показано, как изменяется форма графита в зависимости от уровня содержания магния в чугуне. Если необходимо получить структуру, содержащую 10 – 30 % шаровидного графита, тогда содержание активного магния должно составлять 0.003 %. Вероятность того, что в результате обработки удастся получить содержание магния, способствующее получению структур ЧВГ, при обычных отклонениях по содержанию кислорода, азота, серы, ACEL с использованием традиционных методов контроля составляет менее 80%. Поэтому для гарантии получения отливок из высококачественного ЧВГ необходимо использовать системы контроля металлургических процессов.

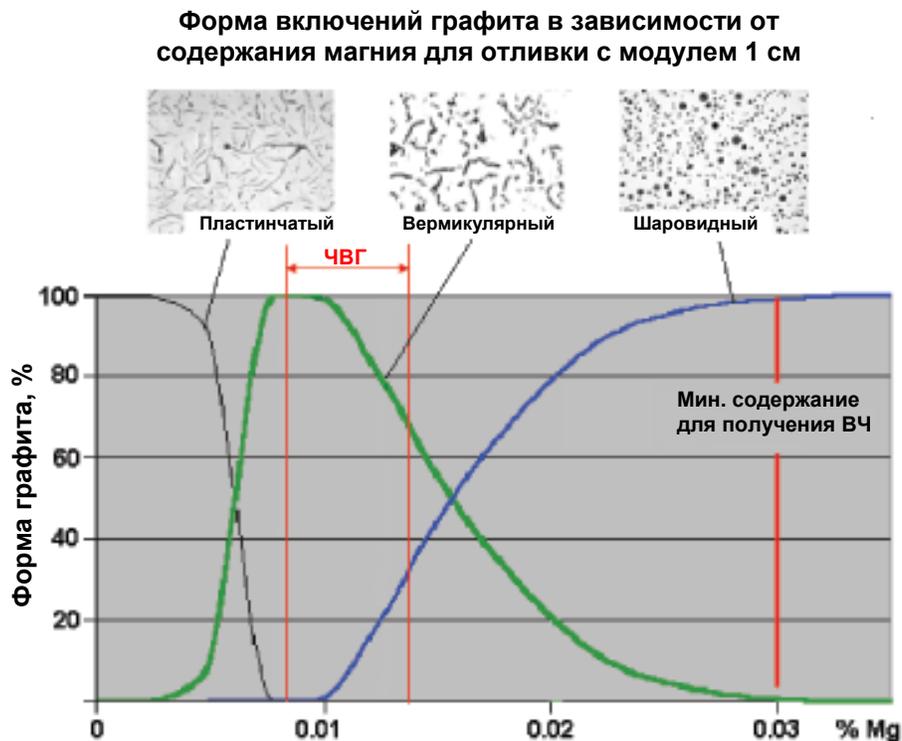


Рисунок 14: Пределы содержания остаточного магния при производстве ЧВГ

Компания NovaCast разработала и запатентовала систему контроля над процессом производства отливок из ЧВГ. Система, названная PQ-CGI® (технология получения ЧВГ высокого качества), была усовершенствована в сотрудничестве с компанией Элкем для ее использования совместно с модификатором, специально разработанным для производства ЧВГ. Система использует комбинацию усовершенствованного количественного термического и химического анализов для определения металлургического статуса базового чугуна. Основываясь на результатах анализа, система выдает рекомендации о том, как надо обработать базовый чугун для того, чтобы довести его металлургический статус до заранее определенных

величин. Как только параметры базового чугуна окажутся в заданных пределах, система рассчитывает необходимую навеску модификатора. Выдаваемые рекомендации тем самым оптимизированы под конкретную плавку. Используя данные рекомендации можно провести несколько обработок чугуна до тех пор, пока используется чугун одной плавки. Система PQ-CGI® так же включает в себя станцию термического анализа для окончательной проверки уже обработанного чугуна.

К настоящему моменту уже используются на реальных производствах следующие модификации системы PQ-CGI®:

- PQ-CGI® Ladle – система контроля над процессом производства отливок из ЧВГ, получаемого ковшевым методом обработки базового чугуна
- PQ-CGI® In-Mould – система контроля над процессом производства отливок из ЧВГ, получаемого внутриформенным модифицированием базового чугуна

ВЫВОДЫ

ЧВГ известен уже много лет, однако, только в настоящее время отливки из ЧВГ начинают занимать своё место в массовом производстве.

Существует три принципиальных способа производства ЧВГ:

- a) Обработка заниженной навеской магния с модификатором типа ФСМг, как правило;
- b) Подавление формирования глобулярного графита и формирование его компактной формы за счет использования комбинации магний + титан;
- c) Использование системы Mg/PЗМ (модификатор СОМПАСТМАГ™).

Последний способ доказал, что обладает рядом существенных преимуществ перед прочими альтернативными методами, а именно:

- Высокая технологичность и гибкость процесса;
- Низкая реакционная способность СОМПАСТМАГ™, что уменьшает потребность в последующем графитизирующем модифицировании;
- СОМПАСТМАГ™ обеспечивает малое содержание остаточного магния и РЗМ в конечном чугуне, что уменьшает склонность к отбелу;
- Может использоваться в более широком диапазоне допустимых содержаний серы;
- Низкий выход шлака;
- Отсутствие проблемы загрязнения возврата титаном;
- Использование СОМПАСТМАГ™ совместно с графитизирующим модификатором Foundrisil® Inoculant в качестве защитного покрытия при ковшевых обработках минимизирует потребность в графитизирующем модифицировании.
- Расплав после обработки может выдерживаться в ковше до 15 мин. без каких-либо отрицательных последствий, вызываемых «старением» модифицирующего эффекта.

Для детальной информации по производству ЧВГ, пожалуйста, обращайтесь в московское представительство компании «Элкем»: т. +7 (095) 232-93-78.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Mekanpublikation Mekanresultat 85002 Mars 1985

[2] BCIRA Broadsheet 253