

# Foundry Alloys



QS-9000    ISO 9001    ISO 14001

## COMPACTMAG™ alloy



[www.foundry.elkem.com](http://www.foundry.elkem.com)

# Модификатор CompactMag™

Для литейного чугуна с вермикулярным графитом.

- ❑ Модификатор разработан специально для получения вермикулярной структуры в чугунах.
- ❑ Экономически более выгоден, чем титан, минимизирует образование шлака и, соответственно, вероятность возникновения шлаковых дефектов.
- ❑ Содержит тщательно сбалансированное количество Mg, Ca и РЗМ, оптимальное для производства ЧВГ.
- ❑ Высокое содержание РЗМ минимизирует чувствительность структуры ЧВГ к толщине отливки.
- ❑ Рекомендуются для чугунов с низким содержанием серы (<0,02%), может использоваться при получении ЧВГ сэндвич-процессом при модифицировании в ковше и внутриформенном модифицировании.
- ❑ Модификатор CompactMag позволяет смешивать отходы ЧВГ и ВЧ без отрицательных последствий.

Чугун с вермикулярным графитом (ЧВГ) является разновидностью литейных чугунов и по механическим и физическим свойствам занимает промежуточное положение между ВЧ и чугуном с пластинчатым графитом. Он представляет особый интерес для специалистов прежде всего полезным сочетанием прочности, теплопроводности и других свойств. При производстве ЧВГ требуется базовый чугун определенного состава, а также управление технологическим процессом, подобным тому, что используют при

изготовлении отливок из высокопрочного чугуна. Пример типичной микроструктуры ЧВГ показан на рис. 1. Данная брошюра описывает особенности сплава ФСМг и успешный метод производства ЧВГ, разработанный компанией "Elkem". Модификатор, получивший название CompactMag, производится на заводе компании "Elkem" в Bjøvefossen, Норвегия, сертифицированном в соответствии с ISO 9001, ISO 14001, а также QS 9000.

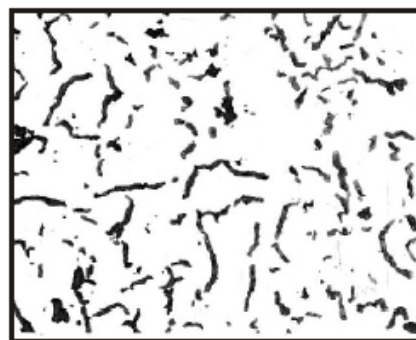


Рисунок 1. Пример типичной микроструктуры чугуна с вермикулярным графитом.

## Высокое содержание РЗМ и производство ЧВГ.

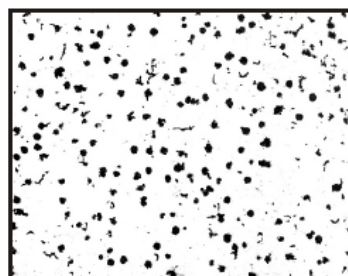
Применение CompactMag дает уникальную альтернативу производства ЧВГ. В частности, высокое содержание РЗМ в сплаве (прибл. 6 %) дает ряд существенных преимуществ, в том числе и при контроле за качеством микроструктуры. Установлено, что РЗМ снижает чувствительность микроструктуры ЧВГ к толщине сечения отливки, что приводит к унификации микроструктуры толстых и тонких сечений сложных отливок. Усвоение РЗМ контролируется легче, чем усвоение Mg. Поэтому результаты работы модификатора более предсказуемы. На рис. 2 и 3

показаны микроструктуры ЧВГ с низким содержанием серы, обработанные двумя марками ФСМг, один из которых содержит около 1% РЗМ, другой – CompactMag – около 6%. При использовании модификатора с пониженным (1 %) содержанием РЗМ (рис. 2) сечение толщиной 5 мм содержит, преимущественно, глобулярный графит, в то время как сечение толщиной 35 мм – в основном, пластинчатый. Это классический пример влияния толщины сечения на структуру графита в процессе производства отливок сложной конфигурации из ЧВГ с использованием

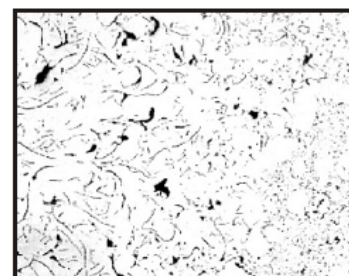
магния. На рис. 3 показана микроструктура, полученная с использованием CompactMag (при той же навеске 0,35 % вес) при модифицировании чугуна с низким содержанием серы. Тонкое сечение (5мм) состоит примерно на 50% из ЧВГ (остальное – глобулярный графит), а структура толстого сечения (35 мм) близка к удовлетворительной микроструктуре ЧВГ. Единственное существенное различие между двумя модификаторами – это уровень содержания РЗМ (1 % и 6 % соответственно).

Кремний (Si)	44 – 48 %
Магний (Mg)	5.0 – 6.0 %
Кальций (Ca)	1.8 – 2.3 %
Редкоземельные элементы	5.5 – 6.5 %
Алюминий (Al)	max 1.0 %
Железо	основа

### Химический состав модификатора CompactMag



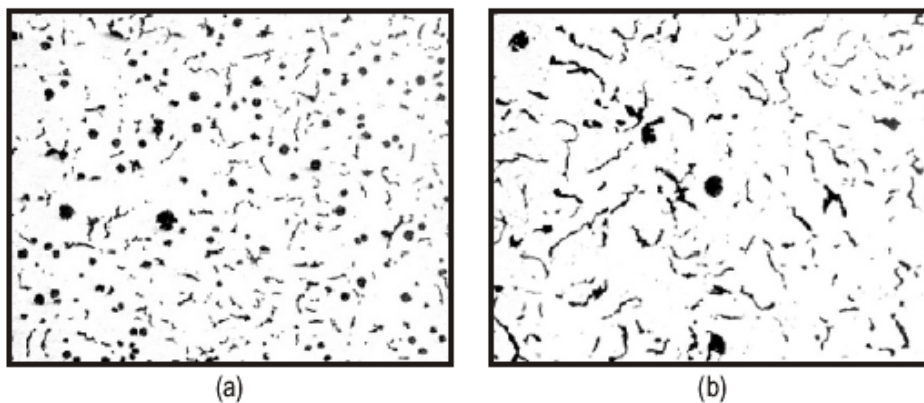
(a)



(b)

Рисунок 2. Пример структуры графита в чугуне с низким содержанием серы, модифицированного 0,35 %вес ФСМг, содержащего 6 % Mg и 1 % РЗМ; (a) сечение 5 мм, (b) сечение 35 мм.

CompactMag™ зарегистрированная торговая марка фирмы Elkem



**Рисунок 3.** Пример структуры графита в чугуна с низким содержанием серы, модифицированного с использованием 0,35 % вес ComractMag;  
(a) сечение 5 мм  
(b) сечение 35 мм.

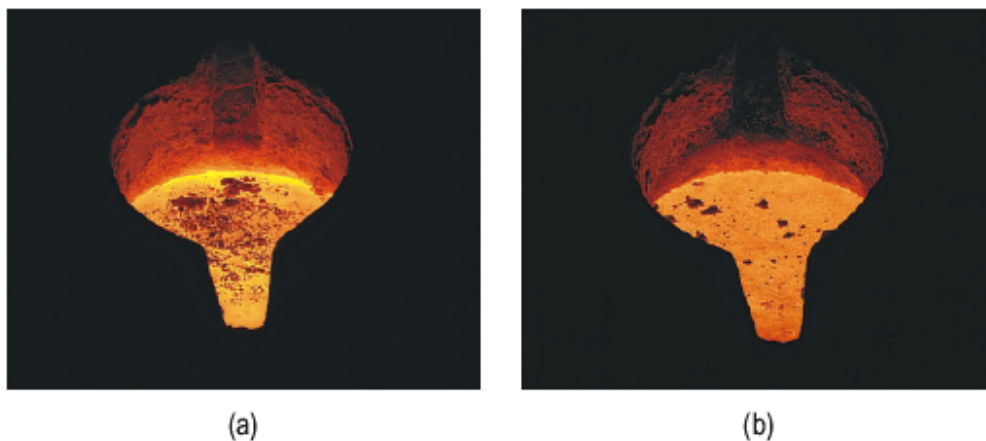
### Альтернатива получения ЧВГ, без применения титана.

Модификатор ComractMag является реальной альтернативой использованию титана при производстве ЧВГ. Использование титана чревато загрязнением возврата. При использовании такого возврата это может

провоцировать неудовлетворительную структуру графита: наличие компактного графита в структуре ВЧ и переохлажденного графита типа D в структуре СЧ. К тому же, применение титана может спровоцировать серьезные

проблемы при механической обработке. Наиболее явные преимущества использования ComractMag в качестве альтернативы титану:

- Устранение возможности загрязнения титаном серых и высокопрочных чугунов.
- Возврат ЧВГ, полученного с помощью ComractMag, можно смешивать с возвратом ВЧ без отрицательных последствий.
- Применение ComractMag вместо титана позволяет доводить требуемое содержание кремния в ковше. Меньшее содержание кремния базового чугуна в печи продлевает стойкость диносовой футеровки.
- Минимальное образование шлака (см. рис. 4).
- Улучшение механической обрабатываемости отливок из-за отсутствия хрупких и твердых частиц карбонитридов титана.
- Существенное снижение затрат на модифицирование.



**Рисунок 4.** Сравнение объема формирующегося шлака в процессе ковшевой обработки:  
(a) обработка титаном,  
(b) модифицирование ComractMag.

#### Вывод:

Модификатор ComractMag, с высоким содержанием РЗМ, является наилучшей альтернативой для производства ЧВГ на предприятиях, которые стремятся избежать применения титана. Кроме того ComractMag является хорошей альтернативой двустадийному процессу обработки базового чугуна отдельно магнием и РЗМ.

## Рекомендации по производству ЧВГ.

Наиболее важными моментами при производстве ЧВГ являются измерение, контроль и поддержание следующих параметров:

- Состав базового чугуна
- Предварительная обработка базового чугуна
- Объем металла и навеска модификатора
- Выход годного
- Графитизирующее модифицирование
- Конечный состав ЧВГ
- Микроструктура
- Свойства отливок

Ниже приведены рекомендации для производства ЧВГ с использованием модификатора CompactMag. Основное правило - ЧВГ должен производиться из базового чугуна с низким содержанием серы, так как высокая сера затрудняет управление процессом и снижает однородность структуры отливок. Рекомендуемый состав базового чугуна:

Сэ	4.3 – 4.5 %
Углерод (С)	3.7 – 3.9 %
Кремний (Si)	1.5 – 2.0 %
Сера (S)	0.005 – 0.010 %
Фосфор (P)	max 0.03 %

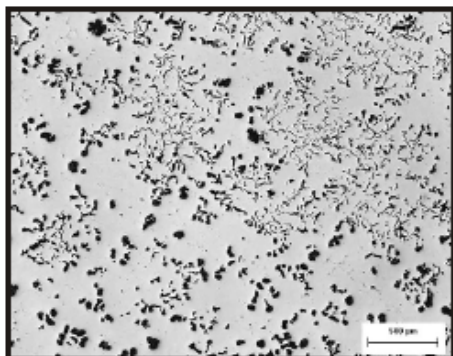
**Рекомендованный состав базового чугуна при использовании модификатора CompactMag.**

Уровень содержания кремния и марганца может изменяться в зависимости от требуемых свойств чугуна. Предложенный состав базового чугуна на ЧВГ подобен составу базового чугуна для ВЧ. Очень важно достигать низкого содержания серы и избегать его колебаний перед модифицированием. Уровень содержания остальных примесей должен быть ниже стандартных норм, разработанных для ВЧ. Важно отдавать отчет, что производство ЧВГ сходно с производством ВЧ. При том, что современные тенденции подразумевают переход на ЧВГ именно с серых чугунов. Так, при использовании

ваграночных чугунов для получения ЧВГ необходимо проводить их десульфурацию. На рис. 5 показан пример структуры графита в отливке, изготовленной из чугуна с базовым содержанием серы 0,07%. Остаточное содержание серы 0,03%, магния – 0,025%. В результате ливкации серы в локальном сечении образовалась смесь графитовых пластин и глобулей, и поэтому отливка из ЧВГ не может считаться качественной.

Контроль за качеством процесса производства ЧВГ посредством тщательного отбора проб строго

необходим. Образцы, предназначенные для исследования, рекомендуется отливать в одной форме с отливкой, так как отдельно изготовленные образцы часто демонстрируют отличия по структуре и свойствам. Необходимо исследовать различные сечения отливок для обеспечения оптимальной микроструктуры в зависимости от навески модификатора. Для чугуна с низким содержанием серы (0,005 – 0,01%) рекомендованная навеска CompactMag составляет 0,3 – 0,4 % вес. при использовании сэндвич-процесса в ковшевом модифицировании.



*Рисунок 5. Пример микроструктуры графита ЧВГ, полученного из базового чугуна с высоким содержанием серы (0,07 %). Бедная компактность графитовой структуры вызвана избыточной ливкацией серы.*

## Конечный химический состав ЧВГ.

В соответствии с рекомендованным выше химическим составом базового чугуна, для получения качественной структуры в ЧВГ достаточно добавить приблизительно 0,3 – 0,4 % вес модификатора CompactMag. Конечный состав чугуна после модифицирования может быть следующим:

C	3.8%
Si	2.5%
Mn	0.30%
P	0.02%
S	0.007%
Ti	0.012%
La	0.008%
Ce	0.015%
Mg	0.010%

*Пример конечного состава ЧВГ при использовании модификатора CompactMag.*

Из перечисленных элементов только присутствие титан является следствием загрязнения отходов. Содержание магния и церия низкое и соответствуют низкому содержанию серы. Возврат такого чугуна абсолютно безопасен при смешивании с возвратом ВЧ. Единственное значительное отличие данного чугуна от ВЧ с низким содержанием серы является более низкое содержание остаточного магния и относительно высокое остаточное содержание церия (для ВЧ типично: 0,04 % Mg и 0,01% Ce). Как правило, усвоение магния и церия из CompactMag составляет порядка 50 – 70 % для Mg и 80 – 90 % для Ce. Усвоение в значительной степени зависит от базового содержания серы, температуры модифицирования, а также от эффективности процесса (сэндвич, «Ковш с крышкой», внутриформенное модифицирование и т.д.).

## Экономические показатели процесса.

При обработке чугунов с низким содержанием серы с использованием титана величина навески, как правило, составляет 1 – 2 % вес ФСМг и 0,1 – 0,6 % вес титана (в виде FeTi). При использовании CompactMag величина навески составляет приблизительно 0,3 – 0,4 % вес. Как в случае применения титана, так и при использовании CompactMag может возникнуть необходимость дополнительного вторичного графитизирующего модифицирования

(Inoculation). Далее приведены примеры модифицирования чугуна с низким содержанием серы с применением титана и CompactMag. Таким образом CompactMag является более предпочтительной альтернативой с точки зрения снижения затрат на модифицирование из-за более низкого расхода. Дополнительное экономия достигается за счет снижения выхода шлака и повышения обрабатываемости отливок.

### Пример двух способов получения ЧВГ:

Titanium	CompactMag
1.3wt% MgFeSi	0.35wt% CompactMag
0.5wt% Ferro Titanium	No Ti added
0.3wt% Inoculant	0.3wt% Inoculant

## Предварительная обработка и вторичное модифицирование ЧВГ.

В большинстве случаев, при производстве ЧВГ требуется вторичное модифицирование. Высокоэффективный графитизирующий модификатор способствует достижению большей степени сфероидизации графита, улучшая тем самым механические свойства отливок. Очень важно избегать образования эвтектических карбидов в отливках из ЧВГ (как впрочем, в СЧ и ВЧ). Вторичное, графитизирующее модифицирование, как правило, необходимо для получения тонкостенных отливок ЧВГ, для гарантированного устранения отбела. Впрочем, применение обычных графитизирующих модификаторов можно рассматривать как компромиссное решение по снижению степени сфероидизации в тонких сечениях с одновременным получением хорошего, компактного графита. ЧВГ получаемый с

использованием CompactMag, может быть вторично модифицирован как ковше, так посредством MSI (позднее модифицирование в струе). Установлено, что для получения отливок из ЧВГ с относительно толстым сечением графитизирующий модификатор можно использовать в качестве защитного слоя CompactMag при заправке реакционного кармана по технологии сэндвич процесс. Практика показывает, что в комбинации с CompactMag, целесообразно применять такие графитизирующие материалы как Foundrisil®, Superseed® и Reseed®. Расход графитизирующего модификатора, как правило, составляет от 0,1 % до 0,5 % вес., в зависимости от способа и места введения, скорости разлива и толщины сечений отливки. Предварительная обработка ЧВГ может быть необходима для контроля за базовой окисленностью

расплава и создания благоприятных условий для более эффективного образования и роста графита заданных форм. Этот процесс требует ввода в расплав малоустойчивых оксидов, предпочтительно, до уровня насыщения расплава. Установлено, что добавка 0,1 – 0,2 % специального модификатора Ultraseed®, содержащего кислород, самым положительным образом сказывается на эффективности процесса. Использование модификатора Ultraseed перед обработкой расплава модификатором CompactMag позволяет достигать оптимального кислородного баланса в базовом чугуне, что обеспечивает эффективный контроль за компактной структурой графита в отливках. Уровень содержания свободного кислорода в базовом чугуне может быть измерен стандартными способами.

## Использование модификатора CompactMag (примеры из практики).

Ниже приведены два примера производства ЧВГ с использованием CompactMag. Данные примеры демонстрируют некоторые особенности и преимущества применения материалов с высоким содержанием РЗМ.

### Пример из практики 1.

Литейные предприятия используют индукционную плавку шихты, состоящей из чистого, передельного чугуна, стального лома, возврата ВЧ, науглероживателя и ферросилиция. Типичный анализ базового чугуна в печи: 3.7 % C  
1.8 % Si  
0.25 % Mn  
0.013 % S  
После ковшевого модифицирования методом сэндвич процесса (0,35 % CompactMag и 0,3 % Foundrisil в качестве защитного слоя) конечный состав чугуна в отливках:  
3.6 % C  
2.6 % Si  
0.22 % Mn  
0.015 % P  
0.009 % S  
0.008 % Mg  
0.015 % Ce  
После начала применения 0,1 % Ultraseed для предварительной обработки базового чугуна был сделан ряд интересных заключений, в том числе касающихся вторичного модифицирования..

### Предварительная обработка.

Рис.6 показывает структуру графита в сечениях 10 мм и 20 мм отливок, обработанных 0,35 % CompactMag и 0,3 % Foundrisil в качестве защитного слоя. Помимо этого чугуна отливок был вторично модифицирован 0.25 % Foundrisil при переливе из транспортировочного в заливочный ковш. Анализ микроструктуры показывает хороший компактный графит с 30 % сфероидизацией как в толстых, так и в тонких сечениях.  
Рис. 7 показывает структуру графита в той же отливке, полученной из аналогичного чугуна предварительно обработанного 0,1 % Ultraseed. В данном случае структура графита более однородна, с более мелкими включениями и со степенью сфероидизации на уровне 20 %. Таким образом, установлено, что предварительная обработка способствует формированию более тонкой и гомогенизированной структуры, без образования графита неправильных форм и большого размера включений, особенно в сечениях 20 мм.

### Вторичное модифицирование.

Рис. 8 показывает структуру графита в отливке, при производстве которой отказались от вторичного модифицирования. Использовали только

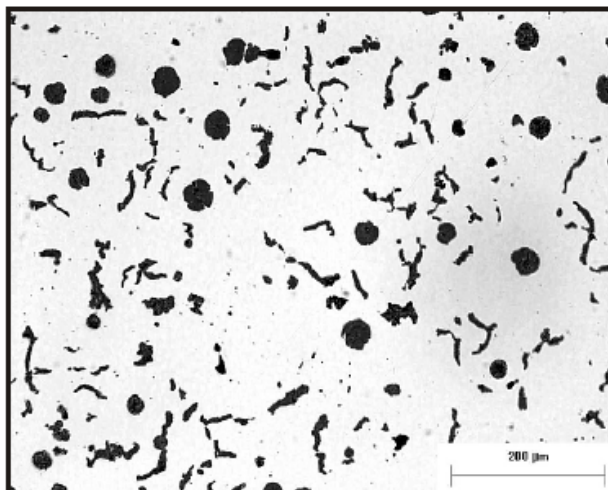
0,3 % Foundrisil в качестве засыпки реакционного кармана. Базовый металл также предварительно обработан 0,1 % Ultraseed. Степень шаровидности графита низкая (10 %) как в толстых, так и в тонких сечениях, а структура ЧВГ составлена большим количеством мелких, компактных графитовых включений. При сопоставлении структур рис. 7 (а) и рис. 8 (а) очевидно, что вторичное модифицирование увеличивает степень шаровидности примерно с 15 % до 30 %. Тем не менее, предварительное модифицирование Ultraseed и использование Foundrisil только в качестве защитного материала облегчает задачу получения качественной структуры ЧВГ, свободной от карбидов даже в сечениях 10 мм. Отказ или существенное снижение от вторичного модифицирования в этом случае положительно влияет на уменьшение степени шаровидности, в то время как улучшение структуры может быть достигнуто другими способами. Рис. 9 показывает распределение коэффициента формы графита для модифицированного и немодифицированного чугуна (сечение 10 мм). Для модифицированной структуры этот показатель составляет в среднем 0,45, в то время как для немодифицированной – только около 0,35. Присутствие в структуре чугуна без вторичной обработки графита с коэффициентом формы значительно меньше 0,8-1,0 (глобулярный

графит), предполагает более качественную структуру ЧВГ. Расчет коэффициента формы графита ведется по формуле:  $4\pi A/P^2$ , где  $A$  – площадь графитовых включений,  $P$  – периметр графитовых включений.

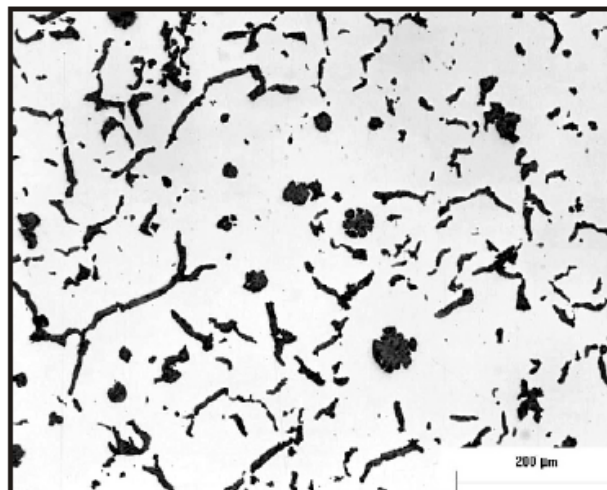
Сопоставление данных термического анализа также позволило выявить ряд замечательных свойств. Вторично модифицированный чугун имеет низкую эвтектическую температуру

(переохлаждение)  $1140^{\circ}\text{C}$ , в то время как температура вторично не модифицированного чугуна находится практически на том же уровне ( $1143^{\circ}\text{C}$ ). Дальнейший термический анализ показывает превосходную устойчивость к формированию усадочной пористости как у вторично модифицированного, так и у немодифицированного чугуна. Это подтверждено измерением уровня усадочной пористости в реальных отливках. Было установлено, что

модифицирование сэндвич-процессом с использованием Foundrisil является выгодной альтернативой, обеспечивающей достаточное модифицирующее воздействие на ЧВГ. Из данного примера следует, что CompactMag оказывает значительное влияние на минимизацию чувствительности структуры в разных сечениях, обеспечивая практически идентичную структуру в сечениях 10 мм и 20 мм одной и той же отливки.

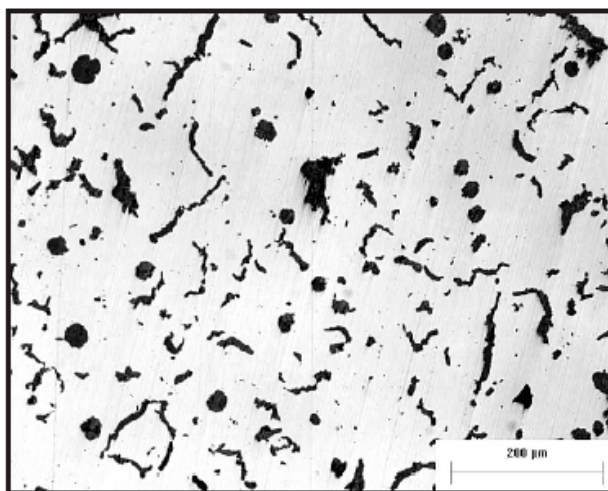


(a)

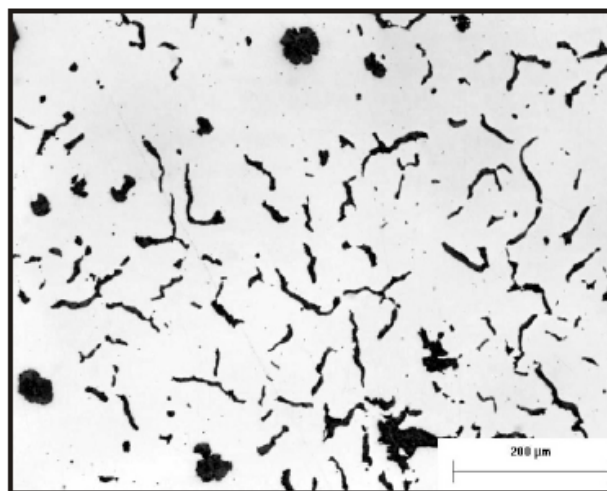


(b)

*Рисунок 6. Пример структуры графита в чугун, после его обработки 0,35 % CompactMag, 0,3 % Foundrisil в качестве защитного слоя и 0,25 % Foundrisil при вторичном, графитизирующем модифицировании. Толщина сечения отливки 10 мм (a) и 20 мм (b).*

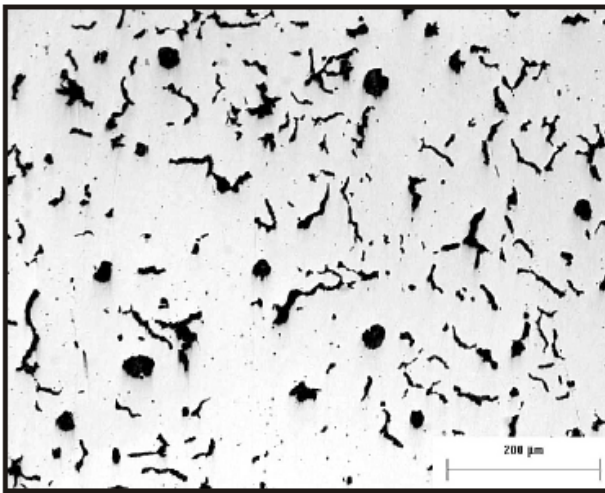


(a)

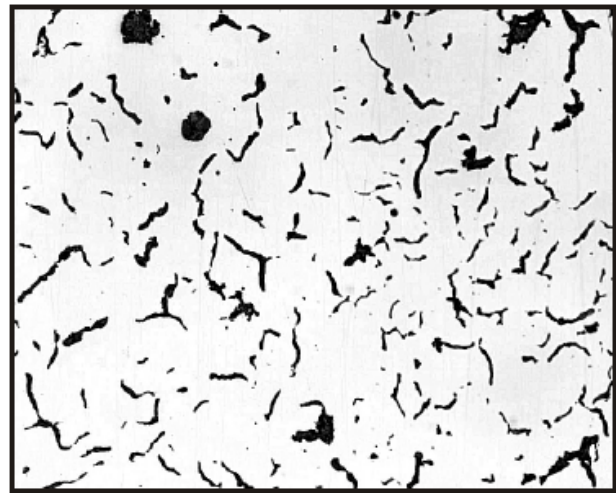


(b)

*Рисунок 7. Пример структуры графита в чугуне, после предварительной обработки 0,1 % Ultraseed с последующей обработкой 0,35 % CompactMag, 0,3 % Foundrisil в качестве защитного слоя и 0,25 % Foundrisil при вторичном модифицировании. Толщина сечения отливки 10 мм (a) и 20 мм (b).*

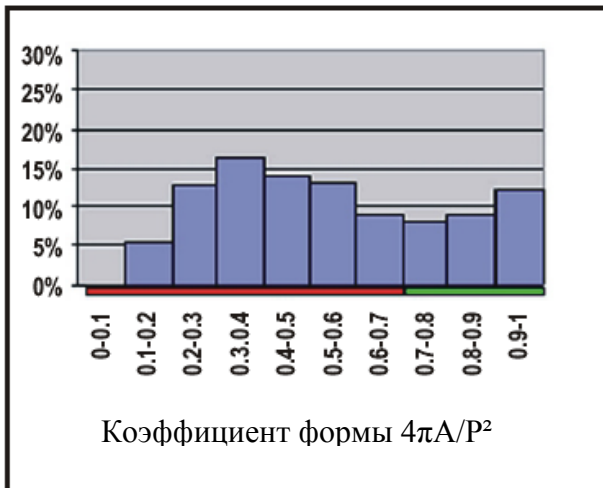


(a)

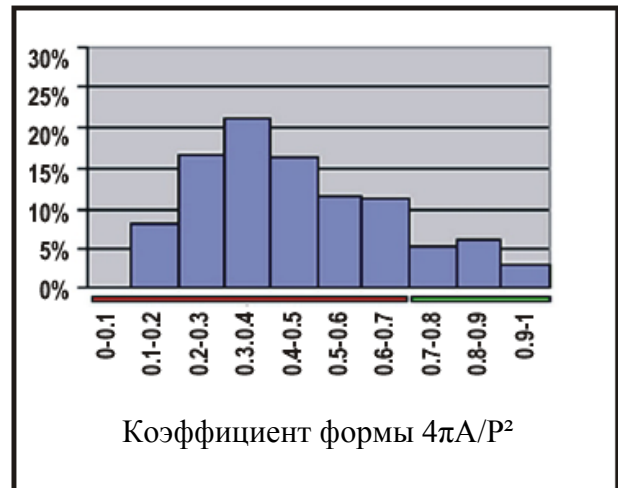


(b)

**Рисунок 8.** Пример структуры графита в чугуна, после предварительной обработки 0,1 % Ultraseed с последующей обработкой 0,35 % ComtractMag, 0,3 % Foundrisil в качестве защитного слоя, без вторичного модифицирования. Толщина сечения отливки 10 мм (a) и 20 мм (b).



(a)



(b)

При коэффициент формы > 0,7  
Включение графита считается глобулярным.

**Рисунок 9.** Гистограмма распределения коэффициента формы для сечения 10 мм: (a) вторично модифицированный чугун, (b) чугун без вторичного модифицирования. Коэффициент формы определяется как  $4\pi \cdot \text{площадь графитовых включений}$  деленная на их периметр.

#### Пример из практики 2.

Литейное предприятие использует ваграночный чугун при производстве ЧВГ. Производительность печи 15 т/ч. Состав калочи: 600 кг стального лома, 650 кг возврата ВЧ, 250 кг передельного чугуна и 20 кг ферросилиция в брикетах. Базовый чугун из вагранки поступает в промежуточный ковш, оснащенный устройством донной продувки через пористые пробки, где одновременно происходят десульфурация, доводка по углероду карбидом кальция и науглероживателем. Типичный химический состав базового чугуна:

3,8 % С  
1,5 % Si  
0,4 % Mn  
0,007 % S  
Базовый чугун в объеме 420 кг при температуре 1480 °С поступает в реакционный ковш, заправленный 1,7 кг ComtractMag (навеска 0,4 % для открытого ковша). Вторичное модифицирование проводят при переливе в малые раздаточные ковши (вместимостью 80 кг) модификатором Foundrisil из расчета 0,5 % вес. Остаточный магний – примерно 0,008 %. Исследование образцов, залитых непосредственно в формах (сечение

25мм), показало наличие в структуре компактного графита (95 % ЧВГ) и только 5 % шаровидного графита. Содержание кислорода в базовом чугуне поддерживается в пределах 50 – 85 ppm. При падении уровня кислорода ниже 50 ppm, его доводку осуществляют посредством Ultraseed в реакционном ковше для предотвращения формирования пластинчатого графита. Значимость кислородного потенциала и предварительной обработки расплава описана выше.



**Elkem ASA**  
Foundry Products Division  
Hoffsveien 65B  
P.O. Box 5211  
Majorstua  
N-0303, Oslo, Norway

Telephone : +47 22 45 01 00  
Telefax : +47 22 45 01 52

Исклучителен представител и  
вносител за България и Македонија:

**“РЕМЕКО” ООД**

1407 София, бул. “Дж. Баучър” № 99-101  
тел.: +359 2 962 20 78, 962 47 36;  
факс: +359 2 962 21 02  
e-mail: [remeko@remeko.com](mailto:remeko@remeko.com)