

Производство высокопрочного чугуна – Сравнение альтернативных методов обработки магнием на ВЧ.

Dr. Torbjørn Skaland - Manager of Research. “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:

Данная статья даёт краткий обзор различных процессов обработки чугуна магнием при производстве высокопрочного чугуна (ВЧ), применяемых в настоящее время на литейных заводах в мире. Приведены основные преимущества и недостатки различных методов обработки.

Ввод в расплав чугуна сфероидизирующих материалов (модификаторов) – одна из самых важных стадий при производстве ВЧ. Магний является наиболее часто применяемым элементом для сфероидизирующей обработки базового чугуна и он часто вводится в расплав вместе с церием и другими редкоземельными элементами. Главная цель любого литейного предприятия заключается в производстве 100 % годного литья требуемого качества, при минимальных затратах. Усвоение элементов во время обработки расплава и выход годного - ключевые факторы для достижения указанных целей.

Перечень факторов, влияющих на усвоение элементов во время обработки на ВЧ, включает в себя:

- температуру расплава
- марку и фракцию применяемого сфероидизирующего модификатора
- количество обрабатываемого металла
- скорость наполнения реакционной ёмкости
- метод обработки.

В статье описываются наиболее коммерчески успешные методы обработки:

- «сэндвич» процесс
- процесс «ковш с крышкой»
- модифицирование в потоке
- внутриформенное модифицирование («ин-моулд» процесс)
- обработка расплава проволокой с наполнителем.

Краткий обзор каждого процесса включает важные особенности процесса, области его применения и ограничения. Описаны основные принципы для выбора правильного метода обработки. Так же приведены предложения по улучшению существующего оборудования. Кроме этого, описаны эффекты воздействия на расплав основных элементов (магния, кальция, РЗМ и кремния), вводимых в расплав посредством сфероидизирующих модификаторов.

1. ВВЕДЕНИЕ

Обработка расплава магнием для сфероидизации графита при производстве ВЧ может быть проведена несколькими различными способами. Магний - самый популярный сфероидизирующий элемент и он обычно вводится в расплав в составе многокомпонентного сплава (модификатора). Эти сплавы содержат небольшое количество различных элементов, позволяющих снизить интенсивность реакции, способствовать сфероидизации графита, нейтрализовать эффект примесных элементов, отрицательно воздействующих на морфологию графита, и контролировать структуру металлической матрицы. Наиболее часто используемый сплав для сфероидизирующей обработки чугуна - ферросилиций, содержащий 3 – 12 % магния. Магний и его сплавы имеют низкую температуру испарения и, следовательно, их ввод в металл необходимо производить под строгим контролем.

Обработка расплава магнием является средством изменения структуры таким образом, чтобы графит выделялся и рос в виде сферических частиц, а не пластин, таким образом значительно улучшая механические свойства отливок. Сфероидизирующее воздействие на расплав можно рассматривать как его десульфурацию и раскисление одновременно, когда в расплав вводятся элементы, обладающие большим сродством и к сере и к кислороду. Когда растворенные сера и кислород удалены из расплава, графит начнет расти в виде сфер (глобулей) согласно его кристаллографическим особенностям.

2. ИСТОРИЯ ПРОЦЕССА

В течение многих лет после начала производства ВЧ (в начале 1950-ых) диапазон различных процессов обработки постоянно расширялся. Ряд процессов признаны эффективными, в то время как другие уже

не применяются. Некоторые из ранних процессов обработки заключались во вдувании порошков в расплав через фурмы с последующим перемешиванием расплава в ковшах, но большинство из них больше не применяются. Распространенные сегодня процессы подразумевают заливку сверху с использованием модификаторов типа ФСМг в ковшах различного типа. Для того, чтобы повысить степень усвоения магния были разработаны ковши различных конструкций. Наиболее удачные модификации ковшей предусматривают применение специальных крышек /1/.

Другая группа процессов обработки на ВЧ – способы непрерывной обработки расплава, представленные «ин-моулд» процессом и процессом модифицирования в потоке. Эти приёмы отличаются тем, что чугун обрабатывается непрерывно во время его движения по модификатору. ФСМг помещается в специально сконструированный резервуар (модифицирование в потоке) или в реакционную камеру литейной формы, являющейся частью литниковой системы («ин-моулд» процесс).

И наконец, последний способ обработки, недавно присоединившийся к основной группе – процесс обработки расплава проволокой с наполнителем. Этот процесс получил популярность в течение последних 10 лет, и он представляет собой тип процесса, где магний содержащий материал (металлический магний или сплав) помещается в полость стальной трубки, которая вводится в расплав. При контакте с горячим металлом проволока растворяется, и реакция с участием магния продолжается в течение всего периода времени, которое требуется для ввода проволоки необходимой длины.

3. СПОСОБЫ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВА МАГНИЕМ.

Этот раздел статьи содержит краткий обзор наиболее распространенных в настоящее время способов обработки базового чугуна на ВЧ. Данные способы включают:

- «Сэндвич» процесс
- Ковш с крышкой
- Модифицирование в потоке
- Внутриформенное модифицирование («ин-моулд» процесс)
- Обработка погружением
- Конвертерный процесс
- Проволока с наполнителем

Важнейшие показатели, области применения и ограничения для каждого процесса проанализированы для сравнительной оценки. Эта оценка будет наиболее интересна для тех литейных предприятий, которые собираются начать производство ВЧ, и поможет выбрать оптимальный тип процесса для конкретных условий и целей производства.

Кроме того, данный обзор содержит полезные рекомендации для литейных производств, которые хотят улучшить экономические показатели действующих процессов производства ВЧ за счёт применения альтернативных способов обработки, которые легко могут быть внедрены на любом предприятии, включая общую оценку капиталовложений /2,3,4/.

Левая колонка Таблицы 1 содержит перечень характерных особенностей различных процессов, некоторые из которых, возможно, нуждаются в дополнительных комментариях:

Строка "**Материал, наиболее подходящий для процесса обработки**" показывает, для какого процесса применяют никель содержащий модификатор, ФСМг или металлический магний.

Строка "**Содержание Mg**" показывает типичное содержание Mg для каждого модификатора, используемого в соответствующем процессе.

Строка "**Усвоение Mg**" показывает разброс усвоения Mg, применительно к конкретному процессу. Относительно широкий диапазон усвоения для некоторых процессов является следствием влияния различных параметров процесса обработки, таких как: температура обработки, дизайн ковша, качество модификатора и химического состава базового металла.

Строка "**Уровень капиталовложений**" даёт оценку капиталовложений для внедрения процесса. Основанием для такой оценки служат возможные затраты на дополнительное основное и вспомогательное оборудование. Так, для ковшевых процессов никаких капиталовложений не нужно, в то время как для внедрения конвертерных процессов потребуются новая установка для обработки расплава и связанная с ней система газоочистки, что ведёт к необходимости больших капиталовложений.

Строка **"Общая гибкость процесса"** описывает возможность внесения изменений в различные параметры процесса, а именно: объем обрабатываемого металла, место проведения обработки, сложности в подготовке к процессу обработки, вариации химического состава базового чугуна, величина навески модификатора, и т.д.

Строка **"Объем выделяющихся газов и дыма"** показывает, сколько паров магния и различных газов будет выделяться при проведении процесса. Ранжирование процессов показывает, что те процессы, которые требуют применения материалов с высоким содержанием Mg (например Mg металлический) способствуют формированию гораздо большего количества дыма и газов чем те, в которых применяют модификаторы ФСМг с содержанием Mg порядка 5 %. Это также означает, что при использовании процесса с интенсивной реакцией потребуются дополнительные затраты на организацию систем вытяжки и газоочистки.

Строка **"Система газоочистки"**. На сегодняшний момент имеется только два процесса, которые, согласно существующим строгим экологическим нормам, не требуют создания специальных систем газоочистки – это процесс «ковш с крышкой» и «ин-моулд» процесс.

Строка **"Ограничения по содержанию серы в базовом чугуне"** показывает максимальный рекомендуемый уровень содержания серы в базовом чугуне до начала проведения обработки на ВЧ. Для большинства процессов с использованием ФСМг с содержанием Mg 3-10 %, не рекомендуется превышать уровень содержания серы в базовом чугуне выше 0.03 %. Для процессов, требующих применения материалов с повышенным содержанием Mg или металлический Mg (обработка погружением, конвертер, проволока с наполнителем) допускается более высокое содержание серы в базовом чугуне. Фактически, некоторые из этих высокоинтенсивных процессов позволяют получать ВЧ непосредственно из высокосернистых ваграночных чугунов.

Строка **"Склонность к вторичному графитизирующему модифицированию"**. Данный показатель напрямую связан с показателем **"Интенсивность реакции"**, и со степенью десульфурации расплава. Для процессов, начинающихся при высоком уровне содержания серы (конвертер, проволока с наполнителем) и удаляющих большую ее часть в процессе обработки магнием, чугун будет хуже откликаться на последующее вторичное графитизирующее модифицирование. Это происходит вследствие того, что большинство потенциальных центров кристаллизации графита (частицы различных сульфидов) будут удалены из расплава во время бурного протекания реакции. Менее интенсивные реакции (ковш с крышкой, «ин-моулд» процесс) практически не снижают уровень содержания серы в чугуне, а формируют большое количество сульфидов малого размера - потенциальных центров кристаллизации графита, которые способствуют повышению эффективности последующей вторичной графитизирующей обработки.

Строка **"Интенсивность реакции"** определяет степень реакционности процесса.

Строка **"Вероятность появления избыточного содержания кремния"** справедлива для всех процессов, где применяются кремний содержащие модификаторы. На литейных предприятиях, использующих большое количество возврата в чугуне и других кремний содержащих шихтовых материалов, может появиться проблема с балансом по кремнию. Для таких заводов процесс обработки расплава металлическим Mg может быть хорошей альтернативой. В сочетании с ФСМг этот процесс поможет улучшить показатели обработки расплава (за счет значительного уменьшения навески ФСМг) и, таким образом, уменьшить общую навеску кремний содержащих добавок в чугун. Как следствие, это может способствовать получению более качественной структуры отливок (меньше количество формирующегося шлака и дресса), уменьшению брака и, следовательно, меньшее количество возврата, нарушающего баланс по кремнию.

Строка **"Габариты оборудования"** даёт возможность оценить необходимость в свободном пространстве литейного цеха для установки оборудования. Как правило, большинство процессов с использованием ФСМг можно с успехом внедрять на малых площадях, в то время как внедрение конвертерного процесса и процесса «проволока с наполнителем» требуют наличия большого свободного пространства, значительных капиталовложений и возможны, как правило, только на больших литейных заводах.

Наконец, строка **"Лицензия/роялти"** означает платежи, которые связанные с правом использования процессов.

4. ПРОЦЕСС «САНДВИЧ С ЗАЩИТНЫМ ПОКРЫТИЕМ»

Название «сэндвич» процесс получил из-за того, что перед заливкой расплава в ковш на сфероидизирующий модификатор насыпают слой материала («сэндвич» слой) для того, чтобы задержать начало реакции модифицирования. Навеска 1 – 2 % стальной стружки – наиболее широко используемый материал в качестве защитного покрытия, хотя и другие материалы, например, ферросилиций, также используются для этих целей. Помимо задержки начала реакции, материал покрытия охлаждает чугун непосредственно перед началом реакции с участием магния. Этот эффект охлаждения металла оказывает положительное воздействие на степень усвоения магния, так как с понижением температуры металла степень усвоения магния повышается. Обычно, усвоение магния для «сэндвич» процесса довольно хорошее и может достигать 50 – 60 %. Основные преимущества процесса – малое время обработки, простота и гибкость процесса, повышенное усвоение магния, относительно малое количество формирующегося шлака и газов. Основным недостатком процесса – незначительная потеря тепла, которая возникает из-за того, что часть тепла расходуется на расплавление 1 – 2 % материала защитного покрытия. Рисунок 1 показывает пример устройства ковша для «сэндвич» процесса со специальным карманом для модификатора на дне ковша /1/.

5. ПРОЦЕСС «КОВШ С КРЫШКОЙ»

Первая публикация по использованию ковшей с крышкой для производства ВЧ была представлена в 1978, хотя информация об использовании подобных процессов обработки имела за 15 лет до этой публикации. Потери магния при его окислении в данном процессе значительно уменьшены, так как наполнение ковша происходит спокойно и равномерно, а кислород воздуха вытесняется из реакционного пространства ковша объемом поступающего металла. Усвоение магния в данном процессе может достигать больших величин, вплоть до 70 – 75 %, что является значительным усовершенствованием по сравнению с более простым методом «сэндвич».

Значительное увеличение степени усвоения магния способствовало широкому внедрению процесса «ковш с крышкой». Первоначально литейные предприятия сталкивались с постоянной проблемой замены крышки после каждой новой обработки (заливки). Однако этот недостаток был устранён посредством внедрения съёмно-стационарных крышек (с болтовым креплением или отдельной системой съёма крышек), что не требует ручного съёма после каждой новой заливки. Рисунок 2 показывает принципиальное устройство простого ковша с крышкой /5,6/.

При внедрении процесса предпочтительно, чтобы соотношение высота/ширина у ковша было не менее 2:1. Для улучшения показателей процесса рекомендуется данное соотношение даже увеличивать. Оптимальная ёмкость для проведения процесса обработки методом «ковш с крышкой» будет похожа на длинную трубу, разделённую вертикально, для её технического обслуживания. Процесс «ковш с крышкой» является наиболее подходящим для любых масс обрабатываемого металла, находящихся в пределах от 100 кг до 10 тонн.

Крышки ковшей могут быть разработаны любых конструкций и соответствовать конкретным условиям любых литейных цехов. Примерами этому могут служить: ковш с фиксированной крышкой, ковши с автоматическим или ручным съёмом крышки стационарные крышки под печью и т.д.

Размеры впускного отверстия крышки должны быть подобраны в соответствии с массой обрабатываемого чугуна. Конструкцией ковша предусмотрено наличие специального реакционного кармана на днище ковша для заправки его модификатором. При проведении модифицирования необходимо следить за тем, чтобы струя металла попадала в пустой отсек для избежания размыва заправки и горения магния в кислороде воздуха при барботаже.

Если модификатор подобран правильно, то при помощи данного процесса можно легко добиться высокой степени его усвоения и качественное модифицирование всего объема обрабатываемого чугуна. Отсутствие белого дыма при обработке обеспечивает благоприятные экологические условия как на участке обработки металла, так и в литейном цехе и указывает на правильный выбор модификатора и безупречный расчёт ковша с крышкой.

Одним из дополнительных преимуществ данной технологии может служить использование двух симметричных реакционных карманов для заправки модификатора в днище ковша. Из-за наличия двух камер ковш может самостоятельно (до некоторой степени) очищаться от шлака, забивающего карманы. Самоочистка происходит посредством попеременного использования кармана в качестве реакционного

и заливочного. Как только карман зарастает шлаком, крышка ковша поворачивается на 180 ° и второй, чистый карман становится реакционным, в то время как загрязненный шлаком становится заливочным.

Для всех видов процессов «сэндвич» и «ковш с крышкой» для облегчения процесса засыпки модификатора на дно ковша или в реакционный карман необходимо применять специальную загрузочную трубу, оборудованную воронкой-раструбом. Заправляя его через трубу, можно избежать просыпей модификатора в другой карман. Кроме того, материал защитного покрытия будет легче размещать поверх модификатора, если он будет так же подаваться через загрузочную трубу.

5.1. Пример ковша с крышкой – «Ковш с фиксированной крышкой»

На Рисунке 3 показано несколько альтернативных вариантов конструкции «ковша с фиксированной крышкой». Фиксированная крышка требует наличия загрузочного отверстия, через которое в ковш будет подаваться ФСМг. Реакционный карман находится с противоположной от падения струи металла стороне. Ковши с фиксированной крышкой не могут подвергаться процедуре скачивания шлака, поэтому накапливающийся в процессе эксплуатации шлак может стать проблемой. Следовательно, для минимизации количества формирующегося в ковше шлака необходимо применять модификаторы с малым содержанием шлакообразующих элементов (Са, Al и PЗМ) /7/.

5.2. Пример ковша с крышкой – «Чайниковый ковш».

Чайниковые ковши обладают тем преимуществом, что ковш можно заполнять и разливать через чайниковый носок. Нет необходимости в использовании крышки для его заполнения. Таким образом, для чайниковых ковшей можно использовать как фиксированные, так и сменные крышки. Для ковшей, имеющих единственную носок, недостатком является риск того, что последние порции металла, заполняющие ковш, не подвергнутся модифицированию. Эти порции металла останутся в носке до начала разливки металла по формам и структура первых отливок может оказаться с малой степенью сфероидизации графита или даже структурой СЧ. Чтобы избежать подобного рода проблем, была разработана конструкция ковша с двумя чайниковыми носками: один используется для заполнения ковша, другой – для разливки обработанного металла по формам. Как правило, из чайниковых ковшей на заливку выходит более чистый чугун из-за эффекта отсечения шлака, присущего чайниковым ковшам. На Рисунке 4 представлены примеры чайниковых ковшей /7/.

5.3. Пример ковша с крышкой – «Ковш со съёмной крышкой».

Процесс обработки чугуна в «Ковше со съёмной крышкой» является, по всей видимости, наиболее гибким и простым в обслуживании. Подъемный механизм может быть или объединен с ковшом посредством специальной скобы, или крышка может сниматься с ковша с использованием, например, автопогрузчика с вильчатым захватом. Крышка также может быть установлена на желоб печи. Преимущества ковшей со сменными крышками – упрощённые процедуры удаления шлака и очистки ковшей, а также то, что одна крышка может использоваться для нескольких реакционных ковшей. Кроме того загрузка ФСМг происходит легче при снятой крышке.

Как показано на рисунке 5, существует множество альтернативных способов устройства ковшей с крышкой, но всех их объединяет один важный факт - большинство литейных заводов могут сделать подобные крышки в собственных механических цехах при минимальных затратах. Любое литейное предприятие может определить, какой тип ковша с крышкой является наиболее подходящим. Помимо этого, всегда существует возможность для собственного творческого подхода при проектировании и модификации существующих и перспективных вариантов. Главные цели разработки нового устройства ковша с крышкой заключаются в улучшении экономических показателей процесса, которые напрямую связаны с рабочими показателями (выход шлака, чистота металла и количество выделяющихся газов и дыма и т.д.) /7/.

6. ПРОЦЕСС ВНУТРИФОРМЕННОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ («ИН-МОУЛД» ПРОЦЕСС)

Процесс внутриформенного модифицирования – это процесс сфероидизирующей обработки чугуна непосредственно в литейной форме. Для проведения обработки в литниковую систему встраивается специальная реакционная камера, как показано на Рисунке 6. Сфероидизирующий модификатор помещают в камеру и обработка расплава происходит в течение всего процесса заливки расплава в форму. Для того, чтобы получить оптимальную степень сфероидизации графита и отливки высокого качества необходим строгий контроль за процессом. Контролируемая реакция модифицирования базового чугуна зависит от ряда условий, включая: температуру металла, скорость потока металла в литниковой системе, размер фракции модификатора, размеры и геометрию отливки.

Усвоение магния на 70 – 80 % типично для данного процесса. Необходимо строго соблюдать следующее правило: содержания серы в базовом чугуне перед заливкой форм должно быть не более 0.01 % для исключения вероятности формирования дефектов по неметаллическим включениям. Время заливки необходимо тщательно рассчитать и контролировать для того, чтобы гарантировать, что модификатор успеет полностью раствориться в металле в течение цикла заливки.

Одним из недостатков данного процесса является уменьшение выхода годного, так как реакционная камера является частью литниковой системы каждой отливки. Повышенный риск образования шлака и попадания других продуктов реакции в тело отливки так же является недостатком процесса. Вследствие этого, необходимо проверять степень сфероидизации графита для каждой произведенной отливки, так как заливка каждой формы, по сути, является отдельным процессом модифицирования (отдельным «реакционным ковшом»). Преимуществом данного процесса является отсутствие необходимости в последующем вторичном графитизирующем модифицировании, так как во время процесса обработки магнием формируется достаточное количество центров кристаллизации графита /8, 9/.

7. МОДИФИЦИРОВАНИЕ В ПОТОКЕ

Процесс модифицирования в потоке или процесс внешней обработки в потоке металла – запатентованный метод обработки расплава (одна из модификаций «ин-моулд» процесса) и также является процессом обработки, проводимым вне литейной формы и ковша. Модификатор помещается в реакционную камеру, по которой протекает базовый чугун и реагирует с модификатором. Размеры камеры являются определяющими величинами для достижения успешной обработки. Так как реакционная камера имеет предварительно рассчитанные фиксированные размеры, то нельзя допускать колебаний по содержанию серы. Согласно отчетам, полученным из различных источников, степень усвоения магния для данного процесса достигает 30 – 50 %. Потребность в модификаторах с низким содержанием магния и некоторые ограничения по размеру используемой фракции могут отрицательно воздействовать на экономические показатели процесса /10, 11/.

8. ПРОЦЕСС ОБРАБОТКИ ПРОВОЛОКОЙ С НАПОЛНИТЕЛЕМ.

На протяжении последних нескольких лет, популярность процесса обработки проволокой с наполнителем для обработки на ВЧ увеличилась. Обычно, полая проволока заполняется или металлическим магнием, или модификатором с высоким содержанием магния. Затем такая проволока вводится в жидкий чугун при помощи трайб-аппарата. Преимуществами данного процесса, согласно имеющимся данным, являются: предсказуемое усвоение Mg, возможность проведения десульфурации и обработки металла магнием в одном ковше, возможность заказа проволоки определенного химического состава (в соответствии с требованиями завода), большая гибкость по уровню содержания кремния в базовом чугуне. В среднем, степень усвоения магния для данного процесса составляет 30 – 50 %. Основные недостатки процесса: большое количество формирующихся шлака и дыма, что связано с высокой интенсивностью реакции. Кроме того, эффект от вторичного графитизирующего модифицирования может быть в значительной степени уменьшен из-за очень интенсивной реакции, так как много потенциальных центров кристаллизации графита попадают в шлак и удаляются из расплава /12, 13, 14/.

9. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ МАГНИЯ

Большинство заводов, производящих ВЧ, используют спектрографы или спектрометры для измерения так называемого «остаточного содержания магния». Путем проведения экспериментальных плавок, на каждом литейном предприятии определяют минимальное количество магния, которое обеспечивает необходимую степень сфероидизации графита в структуре отливок. На разных заводах этот показатель может значительно различаться. На одном литейном предприятии получают превосходную степень сфероидизации при использовании навески 0.025 % магния, другое, возможно, нуждается в навеске 0.06 % магния для того, чтобы получить хорошую структуру с шаровидным графитом. Эти различия возникают из-за влияния определенных известных факторов, которые объясняются далее.

Для начала следует отметить, что «полное аналитическое» или «остаточное содержание магния» в ВЧ существует в виде:

- магния, растворившегося в чугуне
- магний содержащих неметаллических включений (микрочастицы)
- магния, перешедшего в шлак.

Эти три составляющих и определяют остаточное содержание магния. В настоящее время не существует гарантированного аналитического метода, позволяющего определить вклад каждой составляющей в общее остаточное содержание, и, следовательно, содержание магния, определяемое в лабораториях литейных цехов, представляет собой сумму содержаний растворенного магния и магниевых соединений. Фракции микрочастиц и шлаков в образцах постоянно изменяются на значительную величину, в зависимости от условий обработки, что снижает достоверность при определении содержания полного аналитического магния на разных литейных заводах.

Другой важный фактор, влияющий на результаты определения аналитического магния, - методика отбора проб. Если образец для химического анализа взят из верхней части раздаточного ковша и из последних порций разливаемого металла, то анализ проб покажет различные уровни содержания магния. Микрочастицы и частицы шлака будут всплывать в расплаве чугуна по закону Стокса, причем частицы больших размеров всплывают намного быстрее, чем мелкие. Со временем это приводит к неоднородному распределению неметаллических частиц в чугуне, и, соответственно, содержание «аналитического магния» будет изменяться как функция места отбора проб и времени. Этот феномен также вносит свой вклад в различия, наблюдаемые на разных литейных заводах, так как факторы времени и технология отбора проб могут значительно отличаться.

10. ПРИМЕР ПОВЫШЕНИЯ СТЕПЕНИ УСВОЕНИЯ МАГНИЯ.

Практический пример того, как улучшать простой процесс модифицирования на ВЧ заключается в следующем. Гистограмма на Рисунке 7 показывает необходимые навески модификатора для получения структур с шаровидным графитом в ситуации, где:

- начальный процесс - ковш с плоским дном
- защитное покрытие ФСМг - отсутствует
- ФСМг содержит 5 % Mg и 0.5 % Ca
- размер фракции модификатора 10 – 40 мм.

Для указанного случая требуемая навеска сфероидизирующего модификатора может составлять 1.8 % (вес.). Посредством создания на дне ковша простого кармана для модификатора или разделительных стенок можно избежать перемещения модификатора в начальный момент при заполнении ковша. Удерживая модификатор неподвижным в таком кармане, усвоение модификатора увеличивается и навеску можно уменьшить до значений приблизительно 1.6 % (вес.). Кроме того, покрывая модификатор защитным слоем стальной стружки или ферросилицием («сэндвич»), можно отсрочить начало реакции и поднять степень усвоения. Величина навески модификатора в этом случае может быть уменьшена до значений в порядка 1.5 % (вес.).

Если дополнительно к «сэндвич» процессу применить крышку, то горение магния в кислороде воздуха существенно снизится, а процесс обработки будет дополнительно улучшен. Для получения ВЧ хорошего качества уже можно будет использовать навеску модификатора приблизительно 1.3 % (вес.). Если уменьшить размер фракции модификатора с исходного 10 – 40 мм до 1 – 20 мм, то возможно дальнейшее улучшение показателей процесса. Более мелкая фракция и с большим разбросом по рассеву частиц обеспечит увеличение насыпной плотности модификатора в кармане и позволит уменьшить интенсивность реакции (реакционная способность модификатора). При этом возможно дальнейшее уменьшение навески до 1.2 % (вес.). И, наконец, если содержание кальция в модификаторе будет увеличено с 0.5 % до, например, 1.5 % интенсивность реакции (реакционная способность модификатора) будет значительно снижена. Навеска может быть уменьшена до очень низкого уровня, порядка 1.1 % (вес.), при этом будут получены структуры, характерные для ВЧ отличного качества.

Описанный пример показывает возможность экономии больших средств довольно простыми действиями, а литейные заводы в мире сегодня используют навески модификаторов ФСМг и до 2.5 % (вес.) в зависимости от качества их ковшевой обработки и с учетом описанных выше параметров.

11. ФЕРРОСИЛИКОМАГНИЙ (ФСМг)

Микроструктура ФСМг может объяснить большинство особенностей модификаторов данного типа. Фотографии микроструктуры на Рисунке 8 показывают фазовый состав обычного ФСМг стандартного качества. Как видно, ФСМг - довольно сложный материал, состоящий из широкого диапазона различных фаз. Во время растворения модификатора в жидком чугуне, каждая фаза будет воздействовать на чугун по-разному, т.е. с различной химической активностью и скоростью растворения /15/.

Фаза Mg_2Si будет химически активным соединением в чугуне, хотя его химическая активность относительно мала по сравнению с металлическим магнием в контакте с жидким чугуном. Mg_2Si будет растворяться на протяжении всего времени пока определенная часть магния испаряется. Однако, основное количество магния из-за высоких локальных концентраций Si будет растворяться и диффундировать к ближайшим атомам S и O_2 для того, чтобы сформировать частицы сульфидов и оксидов.

Так как Mg_2Si – химически активный компонент, в ФСМг вводится кальций для снижения химической активности модификатора в целом. Формирующаяся фаза Ca-Mg-Si - более устойчива по сравнению с Mg_2Si и это в свою очередь означает, что во время производства ФСМг эта фаза объединится с большей частью имеющегося магния. Ca-Mg-Si при растворении реагирует с чугуном менее интенсивно по сравнению с Mg_2Si . Следовательно, увеличивая содержание кальция и количество сформировавшихся менее активных фаз Ca-Mg-Si, можно уменьшить химическую активность модификатора и, следовательно, улучшить усвоение магния.

Растворение железокремниевых фаз ($FeSi$ и $FeSi_2$) происходит спокойно, обогащая кремнием участки чугуна, расположенные в непосредственной близости от растворяющихся частиц модификатора. Концентрация кремния начнет понижаться от 45 % в непосредственной близости от частиц модификатора до приблизительно 2.5 % в окружающем расплаве чугуна на определенном расстоянии от частицы. Локальное высокое содержание кремния значительно увеличит растворимость магния в чугуне во время работы модификатора. Это, в свою очередь, увеличит степень усвоения магния, так как большая часть магния может быть поглощена чугуном с повышенным содержанием Si для дальнейшей диффузии к ближайшим атомам серы и кислорода вместо того, чтобы формировать пузыри испаряющегося магния.

Большинство модификаторов типа ФСМг содержат приблизительно 45 % кремния. Это минимальный уровень, необходимый для таких высоко химически активных элементов, как Mg, Ca, Ce, и т.д. при формировании соединений с кремнием (силицидов). Силициды – единственные стабильные соединения Mg, Ca, и Ce в сплавах на основе ферросилиция. Если содержание кремния понизить до уровней менее 43 %, то кремния для формирования подобного рода силицидов не хватит. Так как железосодержащие фазы ($FeSi$, $FeSi_2$) не образуют соединения с Mg, Ca или Ce и не растворяют их, то эти элементы были бы потеряны во время производства модификатора с содержанием кремния менее 43 %. Небольшое количество свободной Si-фазы в микроструктуре ФСМг указывает на наличие некоторого избытка кремния.

12. РЕКОМЕНДУЕМЫЕ СОСТАВЫ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ЧУГУНОВ.

Согласно стандарту ISO # 1083 (1976) существует шесть основных марок ВЧ в отливках, обозначенных как: 800/2, 700/2, 600/2, 500/7, 400/12, и 370/17, где первая цифра – минимальный предел прочности (в МПа), а вторая – минимальное относительное удлинение (в процентах). В Таблице 2 приведены рекомендуемые химические составы основных элементов C, Si и Mn для получения указанных свойств. Кроме того, при данных оптимальных составах, приведены изменения основных показателей сплавов как функция размеров сечения отливки (в интервале 13 – 100 мм).

Важно отметить, что существует несколько других металлургических факторов, таких как: обработка расплава магнием, вторичное графитизирующее модифицирование и температура, которые также оказывают значительное воздействие на конечные свойства отливок. Однако, содержание трех основных элементов: углерод, кремний и марганец, должно быть в предложенных пределах для того, чтобы обеспечить наилучшие условия для достижения необходимых свойств.

Помимо этого, для марки ВЧ 370/17 в соответствии со стандартом ISO, уровень содержания кремния должен быть снижен до 2.5 % (максимум) для получения хороших показателей ударной вязкости. Для марок ВЧ 800/2 и 700/2, в состав можно вводить медь или олово, для получения перлитной матрицы и соответствующих механических свойств. Для оптимальной обработки ВЧ, содержание серы в базовом металле должно быть ограничено 0.020 % (максимум), обеспечивая конечное содержание серы в обработанном ВЧ максимум 0.015 %. Кроме того, фосфор во всех марках ВЧ необходимо поддерживать на уровне менее 0.03 %.

13. ПРИМЕР ИЗ ПРАКТИКИ: СРАВНЕНИЕ ПРОЦЕССОВ «ПРОВОЛОКА С НАПОЛНИТЕЛЕМ» – «КОВШ С КРЫШКОЙ».

Данный раздел статьи посвящен обзору основных параметров процессов обработки чугуна проволокой с наполнителем и ковш с крышкой. Сравнение двух альтернативных методов производства

подразумевает рассмотрение положительных и отрицательных сторон каждого процесса. Данное сравнение пригодится на тех литейных производствах, где необходимо сделать выбор в пользу того или иного метода обработки.

Большинство марок проволок с наполнителем содержат или порошок металлического магния, или магний содержащие кремниевые сплавы (>30% Mg). Это необходимо для того, чтобы уменьшить общую длину дорогостоящей проволоки, необходимой для проведения обработки на ВЧ. Как было описано ранее, сплавы с высоким содержанием магния или металлический магний способствуют протеканию более интенсивной реакции по сравнению с обычными сплавами типа ФСМг, а максимальное усвоение магния, согласно литературным данным, для процесса проволоки с наполнителем составляет порядка 50 %. Для оптимизированного процесса получения ВЧ в ковше с крышкой усвоение магния может достигать 75 – 80 %, т.е. почти в два раза выше, чем при обработке проволокой с наполнителем.

Для внедрения процесса обработки проволокой необходимо установить дозирующее устройство (фидер) и оборудовать специальный участок, что сопоставимо со средним уровнем капитальных вложений по модернизации небольших литейных производств. Для процесса «ковш с крышкой» большинство литейных предприятий сами изготавливают крышку в своих механообрабатывающих цехах, а затраты на изготовление ничтожно малы в сравнении с инвестициями в процесс обработки проволокой.

Различие в количестве выделяющегося дыма и газов при горении магния для этих двух альтернативных процессов будет весьма существенно. В процессе обработки расплава проволокой с наполнителем будет формироваться большое количество отходящих газов и дыма, а так же шлака, так как, по крайней мере, 50 % магния будет теряться при интенсивном окислении. Это, в свою очередь, означает, что потребуется отдельная установка удаления и очистки отходящих газов. Такие установки могут быть довольно дорогими и данные затраты должны быть включены в общие капитальные вложения для внедрения данного процесса. Процесс «ковш с крышкой» обычно не требует установки дополнительной системы газоочистки.

Главным преимуществом процесса проволоки с наполнителем является то, что можно обрабатывать базовый чугун с высоким содержанием серы без проведения отдельного процесса десульфурации металла. Процесс «ковш с крышкой» будет самым эффективным, если уровень содержания серы в базовом чугуне ограничен 0.03 % S (максимум). Имеется тесная связь между количеством удаленной серы и эффектом от последующего вторичного графитизирующего модифицирования. Как было показано ранее, удаление большей части серы (проволока с наполнителем) способствует тому, что обработанный чугун сложнее подвергнуть графитизирующему модифицированию, особенно если заливаются тонкостенные отливки. Оптимизированный процесс обработки в ковше с крышкой, который фактически не удаляет серу из чугуна (содержание серы в базовом чугуне и конечное содержание серы равны), обеспечивает намного более прочное основание для очень эффективного последующего графитизирующего модифицирования. Следовательно, если эффективное вторичное графитизирующее модифицирование является критическим параметром, то это так же необходимо учитывать при выборе процесса обработки базового чугуна.

Другим возможным преимуществом процесса проволоки с наполнителем является то, что вместе с проволокой в расплав попадает относительно небольшое количество кремния. Если баланс по кремнию является проблемой даже при малых навесках ФСМг, то проволока с наполнителем может быть интересной альтернативой.

Процесс проволоки с наполнителем обычно не используется для обработок расплава массой менее 500 кг из-за низкой степени усвоения магния и высоких производственных затрат. Для больших масс обрабатываемого металла усвоение магния несколько улучшится, и использование проволоки может стать более целесообразным. Процесс «ковш с крышкой» более гибок в отношении массы обрабатываемого металла и может быть легко внедрен практически для любых объемов обрабатываемого металла - от нескольких килограммов до нескольких тонн. В соответствии с рассмотренным выше, процесс проволоки с наполнителем возможно наиболее подходит для средних и больших литейных заводов (по объемам литья из ВЧ), в то время как процесс обработки ковшем с крышкой может быть внедрен на любом литейном предприятии /16/.

Таблица 3. Сравнение процессов «проволока с наполнителем» – «ковш с крышкой».

	Проволока с наполнителем	Ковш с крышкой
Реагирующий компонент модификатора	Металлический Mg или Mg ₂ Si	ФСМг
Усвоение Mg	30-50%	50-80%
Стоимость применяемого оборудования	Средняя / Высокая	Низкая
Объем выделяющихся газов и дыма	Средний / Высокий	Низкий
Необходимость в установке системы газоочистки	Да	Нет
Ограничения по содержанию S в базовом чугуне	Нет	Макс. 0.03%
Склонность к вторичному графитизирующему модифицированию	Низкая	Средняя / Высокая
Интенсивность реакции	Высокая	Низкая
Вероятность появления избыточного кремния	Нет	Есть
Ограничения по массе обрабатываемого чугуна	> 500 кг	Нет
Размеры оборудования для организации процесса	Средние / Крупные	Любые

Список литературы:

1. Ductile Iron - Molten Metal Processing, 2nd edition, American Foundrymen's Society Publication, Des Plaines, IL, 1986.
2. H.Heine: "An overview of magnesium treatment processes which have stood the test of time in America", BCIRA Conference - S.G. Iron The Next 40 Years, Warwick, UK, 1987.
3. T.Bex: "Ductile iron: one of the century's metallurgical triumphs", Modern Casting, February, 1991.
4. H.Heine: "Comparing seven methods for producing ductile iron", Foundry Management & Technology, August, 1987.
5. T.L.Forshey, et al.: "Modification of, and production experience with the tundish cover for ductile iron treatment", AFS Transactions, pp. 53-57, 1982.
6. R.D.Forrest and H.Wolfensberger: "Improved ladle treatment of ductile iron by means the tundish cover", AFS Transactions, pp. 421-426, 1980.
7. D.S.White: "Tundish treatment ladle developments", Arab Foundry Symposium (Arabcast 91), Cairo, 7-14 December, 1991.
8. K.G.Davis, et al.: "Dissolution of MgFeSi alloy during in mold treatment", AFS Transactions, pp. 379-384, 1978.
9. C.E.Dremann: "New alloys for making ductile iron in the mold", AFS Transactions, pp. 263-268, 1983.
10. P.P.Mohla: "Flow-through processes for ductile iron", Electric Furnace Conference Proc., pp. 355-360, 1992.
11. R. Steel: "The use of the Flotret process for the production of large castings", BCIRA Conference - S.G. Iron The Next 40 Years, Warwick, UK, 1987.
12. H.Mair: "Advancements of cored wire applications within the steel and cast metals industries", 5th Int. Ferroalloys Congress, New Orleans, April 23-26, 1989.
13. R.Cairns: "Manufacture of ductile iron from cupola melted iron using cored-wire technology", 89th IBF Annual Conference (Castcon 92), Stratford-upon-Avon, 11-12 June, 1992.
14. J.Rotella and R.Mickelson: "Using cored wire in the production of ductile iron", AFS Transactions, 1991.
15. Elkem Ferro Alloys, MgFeSi Brochure, April, 1994.
16. T.Skaland: "Principal effects of ductile iron magnesium treatments", AMC Conference Proc., Perth, Western Australia, pp. 69-94, 1995.

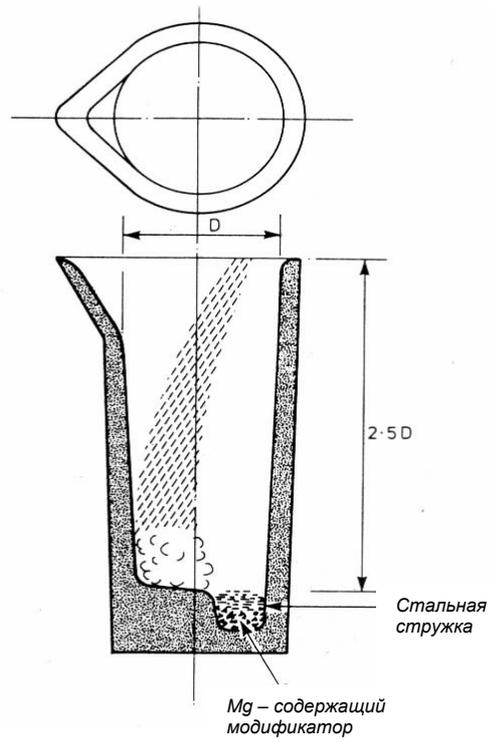


Рисунок 1. Пример ковша для процесса «сэндвич с защитным покрытием» /2/.

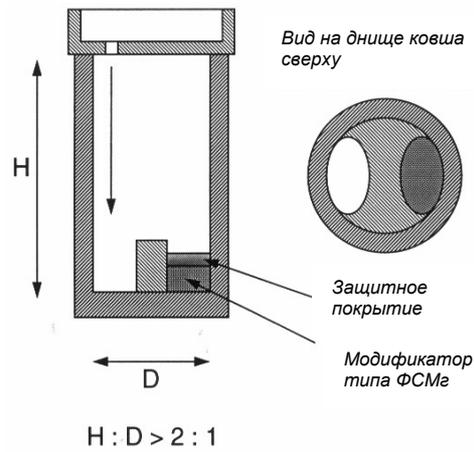
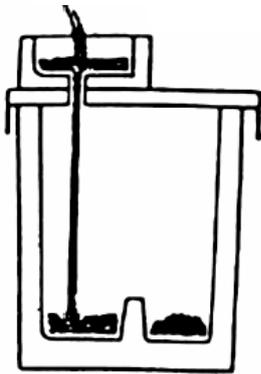


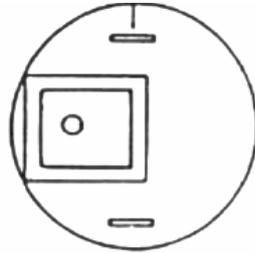
Рисунок 2. Пример ковша с крышкой.

Схематический эскиз процесса модифицирования в ковше с крышкой



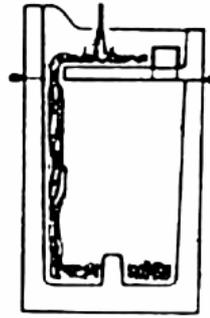
Вид сбоку

Ручки для съема крышки



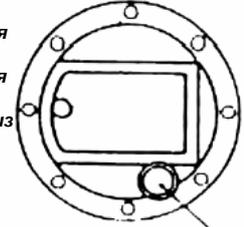
Вид сверху

Первая конструкция ковша с фиксированной крышкой



Вид сбоку

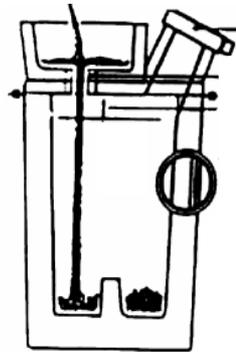
Ковш
заполняется
чугуном и
разливается
после
обработки из
одного
отверстия



Отверстие для загрузки модификатора
закрыто во время обработки

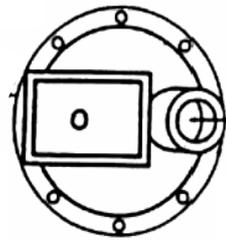
Вид сверху

Второе поколение ковшей с фиксированной крышкой



Вид сбоку

Загрузочный / сливной носок



Вид сверху

Большой носок:

1. Легко заправлять модификатор
2. Максимальный слив шлака
3. Быстрый слив металла
4. Выпускное отверстие не засоряется шлаком

Рисунок 3. Примеры ковшей с фиксированной крышкой /7/.

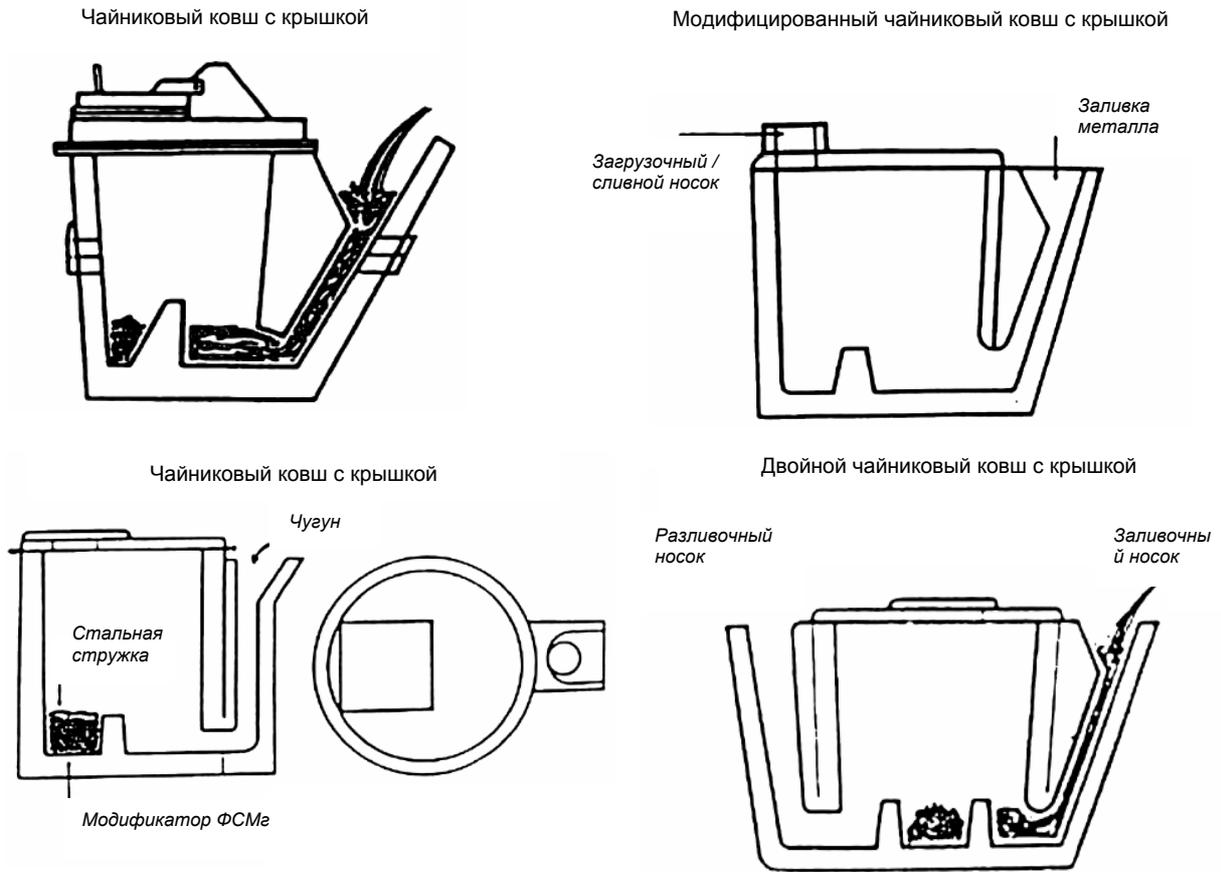


Рисунок 4. Пример чайниковых ковшей с крышкой [7].

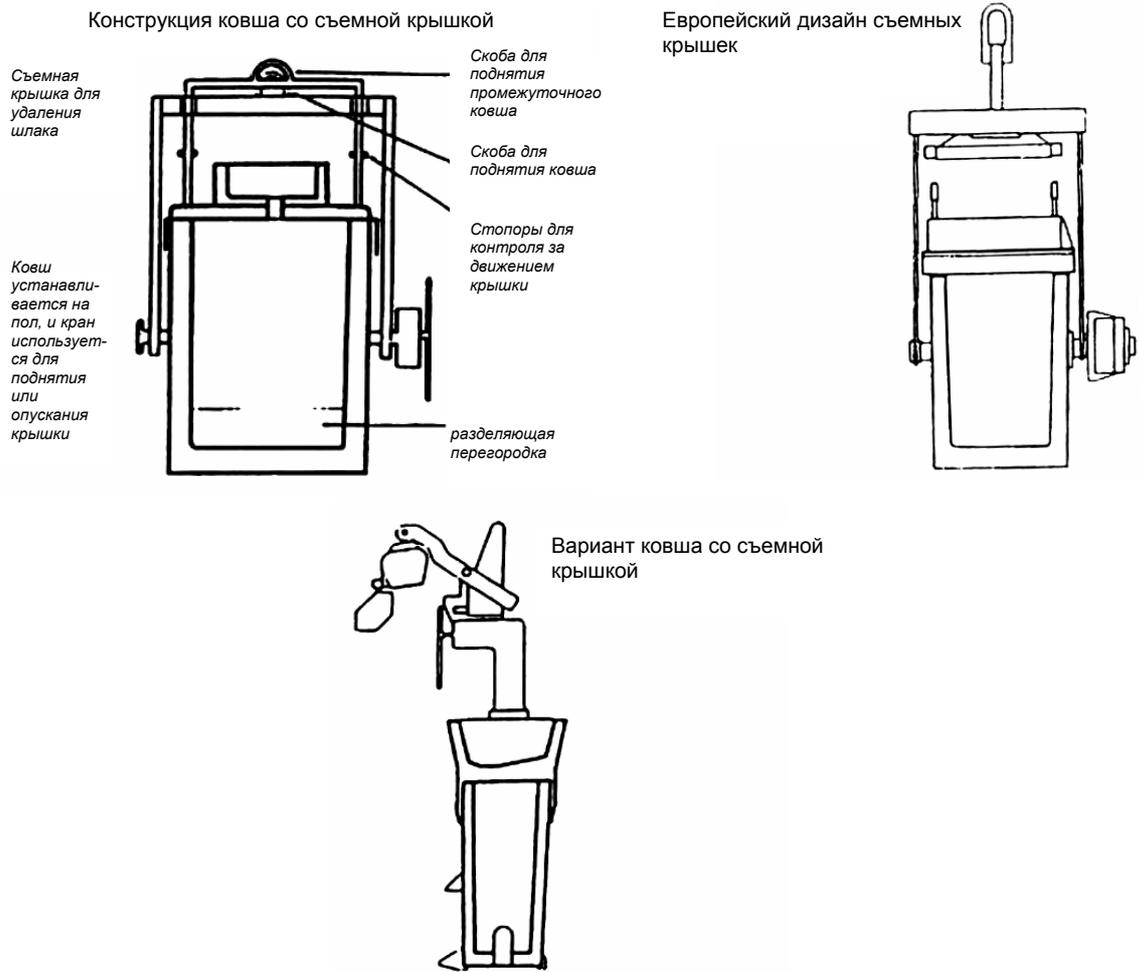


Рисунок 5. Пример ковшей со съёмной крышкой /7/.

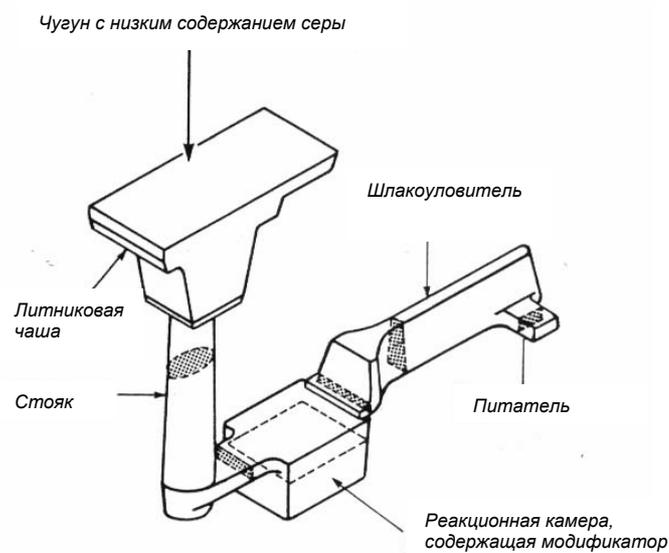


Рисунок 6. Пример «ин-моулд» процесса. /2/

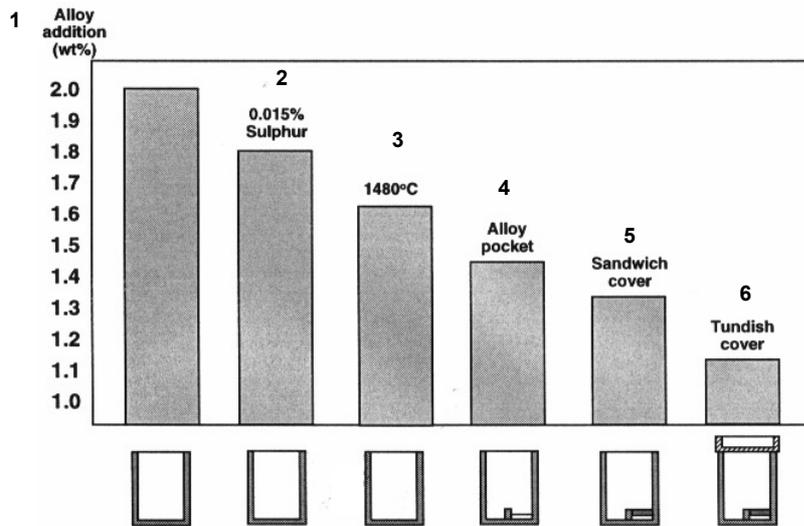


Рисунок 7. Пример улучшения процесса обработки чугуна магнием.

Первоначальный ковш: навеска модификатора 2 % вес при температуре обработки 1520 °С и содержании серы 0,03 %:

1 – навеска модификатора ФСМг (вес %); 2 – при содержании серы 0,015 %; 3 – при температуре обработки 1480 °С; 4 – при загрузке модификатора в специальный карман; 5 – процесс «сэндвич с покрытием»; 6 – ковш с крышкой.

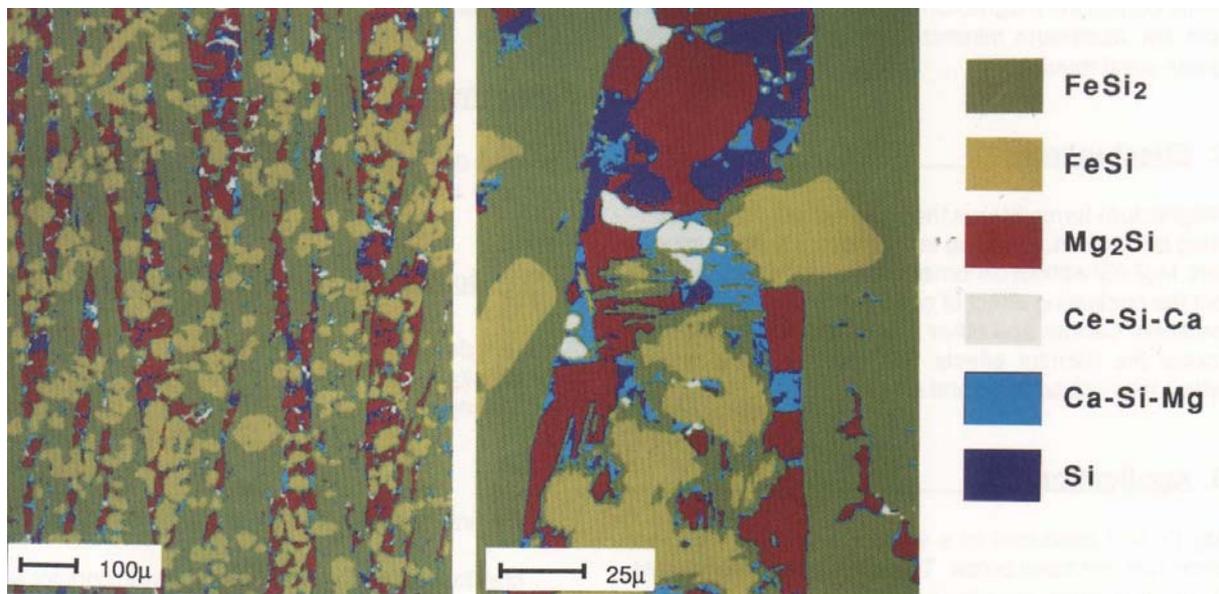


Рисунок 8. Микроструктура ФСМг /15/.

Таблица 1. Обзор главных характеристик различных процессов обработки чугуна магнием.

1	Заливка ковша сверху/сэндвич процесс		Ковш с крышкой	Ин-моулд процесс	Модифицирование в потоке	Модифицирование погружением		Конвертер	Проволока с наполнителем
	2	3	4	5	6		7	8	
Материал, наиболее подходящий для процесса обработки	Сплав на основе Ni	ФСМг	ФСМг	ФСМг	ФСМг	Mg, ФСМг или Mg/Si	Брикеты Mg/Fe	Mg	Mg/Si или Mg
Содержание Mg, %	4-15	3-10	3-10	3-10	3-5	10-45	15 +	100	20-100
Усвоение Mg, %	45-90	35-70	50-80	70-80	30-50	30-60	30-50	30-50	30-50
Капиталовложения	0	0	Очень низкие	0 *)	Низкие	Средние	Средние	Высокие	Средние
Общая гибкость процесса (высшая-6 баллов)	6	6	5	2	3	3	2	1	2
Объем выделяющихся газов и дыма	Средний	Средний/высокий	Низкий	Нет	Средний	Высокий	Высокий	Высокий	Высокий
Система газоочистки	Есть	Есть	Нет **)	Нет **)	Нет ***)	Есть	Есть	Есть	Есть
Ограничение по S в чугуне, %	0.04	0.03	0.03	0.01	0.03	0.04	0.1	Нет	Нет
Место проведения модифицирования	Под пещью	Под пещью	Под пещью	Форма	В камере	Ковш	Ковш	Конвертер	Ковш
Ограничения по массе обрабатываемого чугуна	Нет	Нет	Нет	<500 кг	Нет	> 500 кг	> 500 кг	> 500 кг	> 500 кг
Склонность к вторичному графитизирующему модифицированию	-	Низкая/средняя	Средняя/высокая	-	Средняя/Высокая	Низкая	Низкая	Низкая	низкая
Интенсивность реакции	Низкая/средняя	Средняя/высокая	Низкая/средняя	Очень низкая	Средняя	Очень высокая/Средняя/Высокая	Средняя/высокая	Очень высокая	Высокая
Вероятность избыточного кремния	Нет	Есть	Есть	Маловероятна	Есть	Есть	Нет	Нет	Нет
Размер используемого оборудования	Небольшой	Небольшой	Небольшой	-	Небольшой/Большой	Средний/Большой	Средний/Большой	Большой	Средний/Большой
Лицензия/роялти	Нет	Нет	Нет	Нет	Да****)	Нет	Нет	Да	Нет

*) Для процесса «ин-моулд» необходимо проектировать литниковую систему и реакционную камеру для каждой отливки.

***) При модифицировании в ковше с крышкой и в процессе «ин-моулд» газоочистка не требуется.

****) Рекомендуется общая система газоочистки на участке модифицирования

****) Роялти (авторское право) взимаются за процесс, а не за ФСМг.

Таблица 2. Рекомендуемый химический состав ВЧ.

Среднее сечение отливки (мм)	Марки ISO 800/2, 700/2, 600/3			Марки ISO 500/7			Марки ISO 400/12			Марки ISO 370/17		
	%C	%Si	%Mn ^{*)}	%C	%Si	%Mn ^{*)}	%C	%Si	%Mn ^{*)}	%C	%Si ^{**)}	%Mn ^{*)}
13	3,6-3,8	2,6-2,8	0,5	3,6-3,8	2,6-2,8	0,3	3,6-3,8	2,6-2,8	0,2	3,6-3,8	2,0-2,5	0,1
13-25	3,5-3,6	2,2-2,5	0,6	3,5-3,6	2,2-2,5	0,35	3,5-3,6	2,2-2,5	0,25	3,5-3,6	2,0-2,5	0,15
25-50	3,5-3,6	2,1-2,3	0,7	3,5-3,6	2,2-2,4	0,4	3,5-3,6	2,2-2,4	0,3	3,5-3,6	2,0-2,4	0,15
50-100	3,4-3,5	1,9-2,1	0,8	3,4-3,5	2,0-2,2	0,5	3,4-3,5	2,0-2,2	0,35	3,4-3,5	1,8-2,0	0,2
100	3,4-3,5	1,8-2,0	0,8	3,4-3,5	1,8-2,0	0,6	3,4-3,5	1,8-2,0	0,4	3,4-3,5	1,8-2,0	0,25

*) Рекомендуемое максимальное содержание марганца

***) Если необходимы высокие показатели ударной вязкости (в частности для марки 370/17) содержание Si не должно превышать 2.5 %.