

УДК 621.74.045

**В. С. Дорошенко**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

## ФОРМООБРАЗОВАНИЕ РЕАКЦИОННОЙ КАМЕРЫ ДЛЯ ВНУТРИФОРМЕННОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА ПРИ ЛГМ-ПРОЦЕССЕ

*Предложен способ изготовления реакционного заряда в камере с плёночной оболочкой для внутриформенной обработки расплава при литье по газифицируемым моделям. Для формовки дроблённого модификатора при получении реакционной камеры использован опыт вакуумноплёночной формовки. Упрощение технологии производства отливок из высокопрочного чугуна по процессу литья по газифицируемым моделям будет способствовать сочетанию процессов точного литья и оптимального получения высокопрочных сплавов.*

**Ключевые слова:** высокопрочный чугун, ЛГМ-процесс, ВПФ (V-процесс), внутриформенное модифицирование, песчаная форма, вакуумируемая форма, формовка.

*Запропоновано спосіб виготовлення реакційного заряду в камері з плівковою оболонкою для внутрішньоформної обробки розплаву при литті за моделями, що газифікуються. Для формування дробленого модифікатора при отриманні реакційної камери використано досвід вакуумноплівкової формовки. Спрощення технології виробництва виливків з високоміцного чавуну згідно процесу лиття за моделями, що газифікуються, сприятиме поєднанню процесів точного лиття та оптимального отримання високоміцних сплавів.*

**Ключові слова:** високоміцний чавун, ЛГМ-процес, ВПФ (V-процес), внутрішньоформове модифікування, піщана форма, вакуумована форма, формування.

*There was recommended a method for manufacturing the charge in the reaction chamber with a film coating processing for the in-mold molten metal using Lost Foam Casting Process. For molding crushed modifier in the preparation of the reaction chamber was used V-process experience. Simplification of castings production technology of ductile iron for Lost Foam Casting Process rebds combine processes of precision casting and obtain optimum high-strength alloys.*

**Keywords:** high-strength iron, Lost Foam Casting Process, V-process, modification, in-mold process, sand mold, evacuated mold, molding.

**В**нутриформенное модифицирование (in-mold-процесс) обладает потенциалом ресурсосбережения и является экологически безопасным видом сфероидизирующего модифицирования при получении высокопрочного чугуна (ВЧ). Такая обработка в предкристаллизационный период способствует графитизации углерода, что позволяет получать тонкостенные отливки без отбела в литом состоянии. Однако подобные высокотехнологичные процессы нередко представляются литей-

щикам как усложняющие производство, с изменением режимов технологических операций и конструкции литниковой системы. При инмолд-процессе литниковая система снабжена реакционной камерой, которая выполняет функцию проточного химического аппарата. По данным Oddvar Knustad [1] около 10 % высокопрочного чугуна в мире производится методом внутриформенного модифицирования. В статье [2] указаны объёмы выпуска ВЧ в мире и отставание отечественных литейщиков по невысокой доле ВЧ в общем тоннаже литья.

Обзор отечественных патентов по инмолд-процессу показывает, что для него, как правило, применяют литниковую систему с реакционной камерой в виде разъёмной ёмкости, в, соответственно, разъёмной форме. В отдельных способах литья в эту ёмкость помещают газифицируемую оболочку (из пенополистирола) для интенсификации перемешивания модификатора с жидким металлом при освобождении камеры путём деструкции оболочки потоком металла и стимулировании перемешивания выделяемыми газами [3, 4]. Также пенополистирольную оболочку формуют в песчано-глинистую форму как промежуточную реакционную камеру, что позволяет повысить содержание магния в ВЧ, по сравнению с пустотелой реакционной камерой в такой форме [4]. Также в реакционную камеру вставляют или её роль выполняет газифицируемая модель с замешанным в её материал порошком, примеры применения [3 - 5] описаны при модифицировании в песчано-глинистой форме.

Применение газифицируемого (из пенополистирола [3]) носителя модификатора в своей толще (теле), или в оболочке, вызовет необходимость разработки соответствующей специальной технологии и создания участка изготовления такой оболочки или полимерно-порошкового материала с его замешиванием. Такие носители, вероятно, надо спекать и, как правило, сушить. Для мелкосерийного производства отливок разной массы надо изготавливать стаканы или патроны разных размеров с разными дозами реакционной смеси и, вероятно, газифицируемого материала, который должен иметь достаточную прочность, чтобы не рассыпаться в руках, что может сопутствовать излишней газотворности. А излишний объём несущего материала приведёт к перерасходу металла. Патентная информация содержит описание реакционных камер разных геометрических форм, использование которых с указанными разовыми носителями [3-5] потребует значительного количества различной оснастки.

Разработки газифицируемого носителя (оболочки или ёмкости) модификатора включают примеры применения в разъёмные формы из песчаной смеси со связующим и не рассматривают технологию (ЛГМ) (Lost Foam Casting) с применением форм без связующего. В последнем случае возникает потребность встраивания заряда или реакционной камеры с модификатором в конструкцию разовой модели литниковой системы как единого целого, прикрепленного к пенополимерной модели отливки. К тому же литниковая система при ЛГМ сама представляет «источник» газовыделения, а заливка формы сопряжена с напряжённым газовым режимом с подвижным фронтом газовыделения, нередко с давлением газов выше атмосферного. Последнее условие приводит к тому, что газифицируемые оболочки в ряде случаев потребуется изготавливать с минимальным количеством выделяемых газов при их деструкции или иметь несложные способы регулирования образования газов в реакционной камере при ЛГМ.

Применительно к ЛГМ-процессу в развитие известных способов использования газифицируемых вставок-оболочек и патронов предложена технология формообразования реакционных зарядов, основанная на способе ВПФ (V-процесс), в частности при изготовлении песчаных стержней (без связующего), облицованных синтетической плёнкой. Основой механизма обеспечения прочности при формообразовании таких стержней является внутреннее трение частиц, возникающее как сопротивление сдвигу вследствие зацепления одних частиц за другие. Наибольшим внутренним трением обладают шероховатые частицы с относительно большими неровностями, что свойственно частицам дробленой лигатуры с размерами до 8-10 мм. При ВПФ это трение усиливается известным способом создания перепада

газового давления на загерметизированный (запечатанный) плёнкой песок благодаря вакуумированию песчаной среды стержня.

Интенсифицировать процессы взаимодействия добавок, в том числе мелкодисперсных, в проточных реакционных камерах предложено применением вставок из пенополистирола или другого газонаполненного полимера, однако не с замешанным порошкообразным модификатором [3], а путём пронизывания или армирования патрон или заряд модификатора такой вставкой. Конструктивно это выглядит следующим образом. На пенополистирольную модель литникового хода (между стояком и питателем к отливке) устанавливается реакционная камера с модификатором. Она формируется аналогично стержню при ВПФ, внутрь которого вставляют эту пенополистирольную модель литникового хода.

Один из способов формовки состоит из такого ряда операций. На дно тарельчатой (стержневой) оснастки стелют синтетическую плёнку, на неё насыпают слой («постель») из дроблённого модификатора в необходимом количестве, устанавливают преимущественно горизонтально пенопластовую модель литникового хода, если предусмотрено технологией, досыпают оставшееся расчётное количество модификатора и запаковывают плёнку сверху в практически герметичный пакет.

Возможно применение требуемого размера мешка из плёнки, помещая его в оснастку, или без неё, а в зависимости от количества модификатора и технологических условий упаковку выполняют путём завязывания, заклеивания (включая применение скотча) или запаивания синтетической плёнки. Для крупных камер рекомендуется использование термоусадочной плёнки, которая при обдувании нагретым воздухом с помощью строительного фена усаживается и плотно обжимает отформованную заполненную реакционную камеру, сохраняя приданную ей форму. Описанная упаковка предотвращает попадание формовочного материала в камеру при последующей формовке литниковой системы в сборе с моделью отливки по способу ЛГМ.

Также особенностью формообразования такой камеры является выполнение формовки и упаковки так, что из-под плёнки выступают два конца пенопластовой модели литникового хода, к одному из которых монтируют модель стояка для подачи металла, а к другому для выхода металла из камеры – шлакоуловитель и питатель. При установке в литниковой системе сетки или пенокерамического фильтра вслед за реакционной камерой для очищения металла рекомендуется расширение модели литникового хода с установкой в центре этого расширения поперек хода металла сетки или фильтра с краями, выступающими за пределы модели для фиксации их засыпаемым в форму песком. На рисунке, а схематически показан процесс сборки простейшей модели литниковой системы, состоящей из стояка 1, литникового хода 2, реакционной камеры 3, фильтра 4, питателя 5 и рожкового держателя 6 (скобы), выполненного, например, из проволоки или жести. Этим держателем фиксируют в расширяющейся части модели фильтр 4, через который металл из литникового хода 2 и реакционной камеры 3 сквозь фильтр 4 попадает в питатель 5, который, в свою очередь, крепят с моделью отливки.

Расположенные вблизи реакционной камеры сетку или фильтр также предложено упаковывать в синтетическую плёнку как единый узел модифицирования-фильтрации, включающий заполненную камеру 3, модель литникового хода 2 с сеткой или фильтром 4, для чего предложен фигурный мешок 7, с рукавом 8 (рисунк, б), выполненный из синтетической плёнки. Плёночная оболочка защищает литниковую систему от попадания формовочного песка, даже при небольшой деформации её модели, и позволяет скрепить стык деталей модели в месте крепления сетки или фильтра. Выступающие концы модели этого узла крепятся (чаще быстросохнущим клеем) к торцу модели стояка 1 с одной стороны, и питателем 5 к модели отливки – с другой.

Для создания пространства или зазора между модификатором и песчаной стенкой формы в реакционной камере рекомендовано применение одного или более слоёв воздушно-пузырчатой синтетической плёнки (ВПСП), как углеводородного газонаполненного полимера с прочностью на разрыв значительно более высокой,

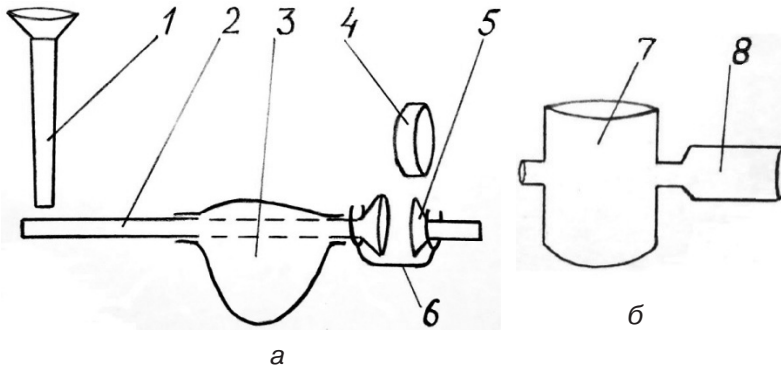


Схема сборки модели литниковой системы (а) и форма мешка для упаковки узла модифицирования-фильтрация (б)

чем у традиционного литейного пенополистирола. Последнее позволило отработать процесс транспортировки разовых моделей с удерживанием их за стояк, выполненный из ВПСП. Такую плёнку производят для упаковки, а в производстве моделей применяют для экономии материала моделей, выполнения в их стенках полостей и уменьшения объема газов при ЛГМ-процессе [6, 7].

Для изготовления моделей применяли ВПСП (типа Bubble Wrap), изготовленную по ТУ2245-006-18425183-2001 (Россия) из пищевого полиэтилена, а также отечественную ВПСП, которую выпускают согласно ТУ У 25.2-30920106-001-2003 из плёнки толщиной по основе от 45 до 300 мкм в зависимости от требуемой прочности. ВПСП не токсична, экологически чиста, что подтверждено соответствующим гигиеническим сертификатом, имеет динамический модуль упругости не менее 0,063 МПа. Производится двух- и трёхслойная ВПСП из полиэтилена высокого давления для применения в диапазоне от  $-60...+80$  °С, при контакте с кипящей водой не плавится, пузыри не разрушаются. ВПСП с диаметром воздушного пузырька 10 мм имеет общую толщину 4 мм, с диаметром пузырька 30 мм – общую толщину 10 мм. Также в продаже имеется плёнка с размерами пузырька (диаметр x высота, мм) 6x3,2; 10x3,2...4,8; 25x8...10. Номенклатура её с каждым годом растёт, цена по отношению к другим полимерам сохраняет тенденцию к снижению, имеется ряд отечественных производителей как ВПСП, так и установок для её производства, тогда как пенополистирол для литейного производства в нашей стране не производится, а используется импортный.

Плотность в рулоне плёнки с пузырьками 30 мм составляет около  $7,5 \text{ кг/м}^3$ , что, примерно, в 3 раза ниже пенополистирола, обычно применяемого для ЛГМ-процесса с плотностью не ниже  $22-25 \text{ кг/м}^3$ , иначе модель может деформироваться при формовке. Соответственно – ниже стоимость рулонных изделий из такой плёнки при сравнимой стоимости веса килограмма ВПСП и пенополистирола. Вес квадратного метра плёнки с пузырьком диаметром 10 мм составляет: двухслойной 63-75 г, трехслойной 90-150 г [7].

При получении разовых моделей [6] описана технология изготовления модели литниковой системы из скрученной ВПСП в рулон нужного диаметра, что не требует специальной оснастки и является простой операцией для изготовления простых тел вращения. Для повторяющихся элементов создают картонные выкройки. Также возможно изготовление мешка из ВПСП (или в разного рода сочетаниях с другого вида пленкой) для формовки реакционной камеры и при заполнении её модификатором помещением отрезков ВПСП (в том числе с различными пузырями) для разделения слоёв модификатора или комбинирования различных его компонентов, включая способ «мешок в мешке». ВПСП достаточно прочный материал на разрыв, она ещё и растягивается при натяжении, что позволяет плотно упаковать реакционную камеру, выполнить её близкой к шаровидной, эллипсоидной, каплевидной формы с

учётом гидравлики процесса литья и уменьшения расхода металла на литниковую систему для внутриформенного модифицирования, а также плавно изогнуть рулонную модель литникового хода.

Для традиционных газифицируемых моделей стояки, прибыли (выпора) часто выполняют квадратными, облегчая вырезание из пенопласта моделей с расчётной площадью поперечного сечения. Это расходует лишний металл при литье и не является оптимальным, с точки зрения теплофизики течения металла. Канал целендрической, а прибыль шаровидной формы наиболее предпочтительны, как описано при изготовлении из ВПСП [6]. То же относится к преимуществам плавных изгибов «мягких» моделей литниковой системы по сравнению с прямоугольными стыками пенопластовых.

Проницающие реакционную камеру модели литниковых ходов можно изготавливать различной формы, кривизны, со смещением их оси от центра камеры для создания турбулентных потоков. Изготовление таких моделей с волнистой поверхностью при помощи пузырьков ВПСП (или облицовке их такой пленкой) увеличивает площадь контакта с частицами модификатора для ускорения начала реакции.

Также вариативность технологии формовки реакционного заряда в мешке из синтетической плёнки для мелких отливок позволяет в простейшем варианте насыпать мешок неполным (включая применение специальной смеси материалов), герметично его закрыть, а затем прикладывать и (или) фиксировать его скотчем к пенопластовой или рулонной модели литникового хода. Сыпучий неуплотнённый материал внутри мешка позволит его изогнуть с желобком под модель литника при формовке в литейном контейнере, а положенный сверху такой модели второй мешок сползёт по её стенкам, облекая эту модель с последующей необходимостью несложного их крепления между собой и (или) к модели. В сумме масса из двух мешков даст расчётную массу заряда при возможном их заполнении различным материалом по виду или зернистости. Возможно последовательное расположение таких зарядов в мешках, например, сфероидизатора и графитизатора, а также использования многоячеистого (по типу ячеек в виде ёмкостей-дозаторов [8]) мешка для расположения ряда ячеек как вдоль, так и поперек оси литника.

Также несложно такой мешок заданной, облегающей литник, формы вакуумировать и запаивать аналогично технологии вакуумной упаковки ледяной модели для ВПФ [9]. Всестороннее действие вакуума прекратит текучесть частиц и «сцементирует» конструкцию, также подобное действие оказывает термоусадочная плёнка, однако она применима для выпуклых конструкций и может деформировать вогнутые поверхности таких изделий.

При литье ЛГМ-процесс обладает спецификой, которая включает виброуплотнение песка в литейном контейнере, что также может уплотнить модификатор и обжечь песком плёночную оболочку. Заливка металла испаряет плёнку, а вакуум в песчаной среде вакуумируемой формы стремится прижать металл к стенке формы, как только тот коснётся песка, и создаёт герметичную металлическую плёнку (корку или фольгу, литейщики называют «чулок») по поверхности песка.

Особенность процессов, протекающих в реакционной камере предложенного типа (газообразование, перемешивание и реакция модифицирования), состоит в следующем. Газифицируемая модель литникового хода позволит первому металлу легко пройти вдоль неё (как по направляющей), реагируя с зёрнами модификатора у её поверхности. При этом избыточное давление выдавит образуемые газы в стенки формы по мере быстрого заполнения камеры и её герметизации металлом, нейтрализуя возможные опасения о влиянии вакуума на процесс растворения магния.

Окраска плёночной оболочки реакционной камеры противопопригарно-герметизирующей краской позволит в некоторых пределах снизить газопроницаемость песчаной стенки, окружающей камеру, а помещение дроблённых отходов пенопо-

лестиролы или синтетической плёнки в сыпучий модификатор облегчит процесс перемешивания реагирующих частиц в дисперсионной среде жидкого металла. Величиной вакуума, газопроницаемостью оболочки и количеством газифицируемого материала в камере возможно регулирование давления газов в литниковой системе. Этот процесс облегчает присущий вакуумируемым формам эффект саморегулирования заливки металла по принципу: «большое давление в полости препятствует подаче металла, а малое – способствует подаче, подсасывая металл пока тот не увеличит давление своим движением, газифицирующим легкоплавкий материал».

В заключение напомним следующие известные особенности инмолд-процесса. Продолжительность заливки традиционно рассчитывают и контролируют с учетом полного растворения модификатора в металле во времени цикла заливки. Пониженный выход годного из-за наличия реакционной камеры для каждой отливки возможно сократить допустимым уменьшением объёма применяемой литниковой системы, включая оптимизацию конструкции реакционной камеры, а также этот недостаток частично компенсирует снижение затрат на модификатор при меньшем угаре магнезия по сравнению с другими процессами модифицирования. Повышенный риск образования шлака и попадания других продуктов реакции в тело отливки устраняют применением сетки или фильтра, а также известными разнообразными конструкциями шлакоуловителей. Желательно чуть ли не для каждой отливки проверять степень сфероидизации графита (для чего предусматривают пробы-приливы к отливкам), поскольку заливка каждой формы со своим процессом модифицирования аналогична модифицированию в отдельном «реакционном мини-ковше» (по аналогии с ковшевым модифицированием для большинства отливок из ВЧ). Инмолд-процесс, как правило, не требует последующего вторичного графитизирующего модифицирования, поскольку при обработке магнийсодержащей лигатурой с минимальным временем до кристаллизации металла формируется достаточное количество центров кристаллизации графита.

Таким образом, описаны варианты формообразования реакционного заряда в плёночной оболочке для внутриформенной обработки расплава металла применительно к ЛГМ-процессу с использованием конструктивных и технологических решений на основе опыта применения ВПФ, литья по разовым моделям и многообразия известных конструкций реакционных камер, в частности, описанных в работе [3]. Совместное использование высокотехнологичных инмолд-процесса и ЛГМ-процесса соответствует актуальной тенденции металлосбережения как приоритетного направления совершенствования литейного производства. Снижение металлоёмкости достигается путём оптимизации литых конструкций на основе применения инновационных технологий точного литья, в частности ЛГМ-процесса, в сочетании с использованием высокопрочных сплавов.



### Список литературы

1. *Oddvar Knustad*. Внутриформенное модифицирование на ВЧ // Литьё Украины. – 2003. – № 10. – С. 13-15.
2. *Дорошенко В. С.* Предложения по металлосбережению при литье высокопрочного чугуна в песчаных формах / В. С. Дорошенко // Металл и литьё Украины. – 2016.- № 2. – С.
3. *Фесенко М. А.* Перспективные направления использования метода внутриформенного модифицирования расплава для изготовления отливок с заданными эксплуатационными свойствами / М. А. Фесенко, А. Н. Фесенко // Литьё и металлургия. – 2013. – № 4. – С. 36 - 41.

4. Пат. 13632 України, МПК В22D27/00. Спосіб обробки чавуну в ливарній формі / А. М. Фесенко, М. А. Фесенко. – Опубл. 17.04.2006, Бюл. 5.
5. Пат. 46486 України, МПК В22D 27/00. Спосіб обробки рідкого металу / А. М. Фесенко, М. А. Фесенко. – Опубл. 25.12.2009, Бюл. 24.
6. Пат. 79267 України, МПК В22С 7/02, В22С 9/04. Одноразова ливарна модель / В.С. Дорошенко, О. Й. Шинський. – Опубл. 25.04. 2013, Бюл. 8.
7. Пат. 82025 України, МПК В22С 7/02, В22С 9/04. Ливарна одноразова модель з вуглеводневих полімерів / О. Й. Шинський, В. С. Дорошенко. – Опубл. 25.07.2013, Бюл. 14.
8. Пат. 83892 України, МПК В22С 9/02, В22С 9/04. Ливарна форма / О. Й. Шинський, В. С. Дорошенко. – Опубл. 26.08.2008, Бюл. 16



### References

9. *Дорошенко В. С.* Многовариантность использования ледяных моделей при литье в песчаные формы / В.С. Дорошенко // *Металл и литье Украины*. – 2010.- № 12. – С. 17 – 26.
1. Oddvar Knustad. (2003). Vnutriformennoe modificirovanie na VCh. *Lit'ie Ukrainy*, № 10, pp. 13-15 [in Russian].
2. Doroshenko V. S. (2016). Predlozheniia po metallosberezeniiu pri lit'ie vysokoprochnogo chuguna v peschanyh formah. *Metall i lit'ie Ukrainy*, № 2 [in Russian].
3. Fesenko M. A., Fesenko A. N. (2013). Perspektivnye napravleniia ispol'zovaniia metoda vnutriformennogo modificirovaniia rasplava dlia izgotovleniia otlivok s zadannymi ekspluatatsionnymi svoistvami. *Lit'ie i metallurgii*, № 4, pp. 36-41 [in Russian].
4. Pat. 13632 of Ukraine, MPK V22D27/00. Sposib obrobky chavunu v livarnii formi. Fesenko A. M., Fesenko M. A. Publ. 17.04.2006, Bul. 5 [in Ukrainian].
5. Pat. 46486 of Ukraine, MPK B22D 27/00. Sposib obrobky ridkogo metalu. Fesenko A. M., Fesenko M. A. Publ. 25.12.2009, Bul. 24 [in Ukrainian].
6. Pat. 79267 of Ukraine, MPK V22S 7/02, V22S 9/04. Odnorazova lyvarna model'. Doroshenko V.S., Shyns'kii O. J. Publ. 25.04. 2013, Bul. 8 [in Ukrainian].
7. Pat. 82025 of Ukraine, MPK V22S 7/02, V22S 9/04. Lyvarna odnorazova model' z vuglevodnykh polimeriv. Shyns'kii O. J., Doroshenko V. S. Publ. 25.07.2013, Bul. 14 [in Ukrainian].
8. Pat. 83892 of Ukraine, MPK V22S 9/02, V22S 9/04. Lyvarna forma. Shyns'kii O. J., Doroshenko V. S. Publ. 26.08.2008, Bul. 16 [in Ukrainian].
9. Doroshenko V. S. (2010). Mnogovariantnost' ispol'zovaniia ledianykh modelei pri lit'ie v peschanye formy. *Metall i lit'ie Ukrainy*, № 12, pp. 17-26 [in Russian].

Поступила 02.03.2016