

Министерство образования Российской Федерации
Хабаровский государственный технический университет

В. М. Григорьев

**ЛИТЬЕ ПО
ВЫЖИГАЕМЫМ
МОДЕЛЯМ**

Утверждено

издательско-библиотечным советом университета

в качестве учебного пособия

Хабаровск

Издательство ХГТУ

2002

УДК 681. 518 Литье по выжигаемым моделям: Учебное пособие для студентов специальности 110400 литейное производство черных и цветных металлов // Сост. В.М. Григорьев. — Хабаровск: Изд-во Хабар. гос. техн. ун-та, 2002.

Учебное пособие разработано на кафедре “Литейное производство и технология металлов”, в соответствии с учебным планом на основании рабочей программы дисциплины “Технологические основы литейного производства” для студентов специальности 110400 “Литейное производство черных и цветных металлов”. Приведен материал, отражающий основы технологии литья по выжигаемым моделям с иллюстрациями. Пособие предназначено для курсового и дипломного проектирования.

Печатается в соответствии с решением кафедры “Литейное производство и технология металлов”.

© Издательство Хабаровского
государственного технического
университета, 2002 г.

Введение.....	4
1. Сущность метода.....	4
2. Исходные материалы для моделей	7
Марка полистирола.....	10
3. Изготовление моделей из полистирола.....	12
3.1.1. Методы вспенивания полистирола.....	13
3.1.2. Особенности конструкции прессформы	14
4. Технологические особенности литья по газифицируемым моделям ...	16
4.1.1. Термическая деструкция пенополистирола.....	17
Выход, вес. %	19
4.1.2. Газовый режим литейной формы.....	20
5. Особенности проектирования технологического процесса.....	29
6. Изготовление отливок по выжигаемым моделям	36
6.1.1. Механика песка.....	38
6.1.2. Свойства других сыпучих огнеупорных материалов	39
6.1.3. Теоретические основы получения отливок в форме из сухого песка.....	41
6.1.4. Особенности проектирования литниковой системы	42
6.2.1. Поведение ферромагнитных частиц в постоянном магнитном поле	44
6.2.2. Свойства ферромагнитных формовочных материалов и магнитных форм	46
7. Брак отливок и меры его предупреждения.....	50
Заключение.....	Ошибка! Закладка не определена.
Литература	Ошибка! Закладка не определена.

Введение

Литье по выжигаемым (газофицируемым) моделям, также как и литье по выплавляемым моделям, выполняется в неразъемные формы, а модель удаляется путем выжигания. В процессе заливки жидкого металла в форму под действием высокой температуры происходит термодеструкция пенополистирола, из которого изготавливается модель. Газофицируемая модель постепенно замещается расплавом по мере поступления последнего в форму. Способ производства отливок по газофицируемым моделям был предложен в 1958 г. Г. Шрейером.

Литьем по выжигаемым моделям можно производить отливки в различные формы: в обычные разовые, в сухой песок, в формы из ферромагнитных материалов, находящихся под действием магнитного поля. Модель может быть вырезана из пенопласта или изготовлена из вспенивающегося полистирола в пресс-формах. В первом случае она не отличается точностью от деревянной модели, но не требует больших затрат при изготовлении. Поэтому если необходимо изготовить одну сложную отливку, то целесообразность такой модели очевидна. Модели, изготовленные в пресс-формах на специальных машинах, применяются в массовом производстве и имеют точность, сопоставимую с выплавляемыми моделями. Особенностью рассматриваемого способа литья является процесс термодеструкции, связанный с выделением газов и продуктов разложения материала модели. Этот факт необходимо учитывать при разработке технологии и подборе материалов.

1. СУЩНОСТЬ МЕТОДА

Модель из полистирола может изготавливаться, также как и восковые модели, в пресс-формах, а также вырезаться из пенополистирола. При из-

готовлении моделей в пресс-формах в качестве исходного материала используется вспенивающийся полистирол, который поставляется в гранулированном виде. Для литейного производства выпускают специальные марки литейного пенополистирола. Под воздействием тепла гранулы вспениваются, увеличиваясь в объеме в 5...7 раз. В пресс-форму засыпают расчетное количество гранулированного полистирола и подают пар. Полистирол вспенивается, увеличиваясь в размерах, и занимает объем пресс-формы. В мире разработаны и производятся машины для изготовления моделей из вспенивающегося полистирола. Такая технология получения моделей приемлема в массовом производстве отливок. Но производить литье по выжигаемым моделям можно и в единичном производстве. В этом случае модель должна быть изготовлена из пенопласта путем вырезания, а форма может быть традиционной – в опоках с применением обычной формочной смеси. Для повышения качества поверхности будущей отливки модель может быть окрашена быстросохнущей краской. В этом случае тепловая сушка краски неприемлема.

Этим способом можно получать отливки без стержней, без уклонов, без заливов и швов с более жесткими допусками на размеры и с уменьшенными припусками на механическую обработку по сравнению с литьем в песчаные формы по деревянным или металлическим моделям.

Способ литья по выжигаемым моделям позволяет использовать для формы *сухой песок*, что снижает трудоемкость процесса. При этом может применяться вакуумирование формы, которое обеспечивает удержание песка и удаление продуктов термодеструкции.

Использование вместо сухого песка сыпучего ферромагнитного материала, например дроби или металлического песка, позволяет применить магнитное поле для удержания формы в процессе заливки металла. Однако взаимодействие расплавленного металла с продуктами деструкции мате-

риала модели нередко приводит к появлению специфических дефектов отливок: поверхностных раковин (вследствие отложения твердого углерода); газовых раковин; волнистости поверхности отливок и др. Качество поверхности отливок существенным образом зависит от свойств материала модели, в частности его удельного веса. При уменьшении удельного веса материала снижается количество продуктов деструкции, но уменьшается жесткость и прочность модели, что увеличивает вероятность деформации при использовании уплотняемых песчано-глинистых смесей.

Возможность получения отливок в формах из сухого песка без связующего различные исследователи объясняют по-разному. С одной стороны, считается, что форма из сухого песка приобретает прочность за счет связующего действия сконденсированных в порах формы продуктов испарения пенополистирола, образующихся в процессе его газификации. С другой стороны, отрицается связующее действие продуктов конденсации и утверждается, что устойчивость форм из сухого песка и возможность формирования в них отливок объясняется безззорным замещением модели расплавом. Однако рядом исследователей установлено, что зазор между моделью и расплавом образуется и величина его зависит от температуры расплава скорости заливки, гидростатического напора и других факторов. Считается, что основным фактором, удерживающим песок в устойчивом положении, является действие фильтрационных сил газового потока, образующегося в результате взаимодействия материала модели и расплава.

Вместе с тем следует отметить, что при изготовлении отливок в формах из сухого кварцевого песка без связующего из-за несоответствия размеров отливки и модели и вследствие песчаных засоров довольно значительное количество отливок бракуется (например, по данным А. Витмозера [1] брак достигает 15...30 %). Нанесение на пенополистироловую модель прочной и газопроницаемой краски, стабилизирующей формы из сы-

пучего материала до момента образования затвердевшей корочки отливки, позволило снизить брак отливок.

В 70-х годах изобретен способ литья в *магнитные формы* по выжигаемым моделям. Его суть заключается в следующем. Пенополистироловая модель засыпается ферромагнитным формовочным материалом, на который накладывается магнитное поле. Под действием магнитного поля частицы ферромагнитного материала связываются в единое целое. Заливку производят как обычно. После снятия магнитного поля формовочный материал высыпается из опоки. Такой способ получения отливок сохраняет основные достоинства литья в формы из сухого кварцевого песка и в то же время устраняет их основной недостаток — образование засоров. Однако этот способ нашел применение для получения отливок сравнительно небольшой массы и простой конфигурации. Наибольшее уплотнение получает материал формы, расположенный у стенок, которые простираются вдоль магнитных линий. Поэтому для литья массивных и сложных отливок требуется большая напряженность магнитного поля, для создания которого необходимы магниты очень больших размеров. Очевидно, этот факт и является основным препятствием для развития этого процесса. Возможно, создание сверхпроводников в будущем позволит создать мощные компактные магниты для этого способа литья.

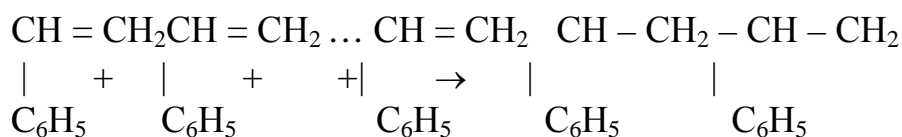
2. ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ МОДЕЛЕЙ

Изготовление моделей из пенопластов на основе эпоксидных смол, полиуретана, фенольно-резольных смол, полистирола и других материалов показало, что наиболее приемлемым для литья по газифицируемым моделям являются пенопласты на основе полистирола, так как они имеют наименьшую газотворную способность, минимальный негазифицируемый остаток после разложения и отличаются высокой скоростью газификации.

Полистирол получается в результате полимеризации стирола – ароматического соединения с ненасыщенной боковой связью $C_6H_5CH = CH_2$. Стирол – бесцветная жидкость плотностью $0,905 \text{ г/см}^3$ и температурой кипения $145 \text{ }^\circ\text{C}$. Для получения стирола используется бензол и этилен.

Известно три метода получения полистирола: метод полимеризации чистого стирола (или метод блочной полимеризации), метод полимеризации его в растворителе и метод эмульсионной полимеризации.

Наиболее распространен метод эмульсионной полимеризации стирола при температуре $70...90 \text{ }^\circ\text{C}$ по следующей схеме:



Полистирол – бесцветный и прозрачный пластик, растворяется в ароматических углеводородах, во многих эфирах и не растворяется в спиртах и бензине. При нормальных условиях полистирол представляет собой твердый упругий материал плотностью $1,05 \text{ г/см}^3$. Температура его стеклования около $80 \text{ }^\circ\text{C}$; при $80...90 \text{ }^\circ\text{C}$ он становится эластичным. Такие характеристики, как вид порообразователя и способ введения его в полистирол, молекулярный вес полистирольной основы и др., существенно влияют на свойства пенополистирола. В промышленности пенополистирол получают обычно двумя методами: *прессовым* и *беспрессовым*.

Прессовый метод. Эмульсионный полистирол механически смешивают с порообразующим веществом и другими добавками. Затем смесь прессуют при нагревании. Выделяющиеся продукты распада порообразователя насыщают расплавленный полистирол. После охлаждения получают заготовки полистирола, которые при повторном нагреве в замкнутом объеме пресс-форм вспениваются, заполняя ее полость. Этим методом получают пенопласты ПС-1, ПС-2, ПС-3. При большом молекулярном весе исходного эмульсионного полистирола и значительной плотности вспенен-

ного материала ($0,08...0,2 \text{ г/см}^3$) пенополистирол невозможно использовать для литья по газифицируемым моделям.

Беспрессовый метод. Этим методом получают модели как газифицируемые, так и предварительно удаляемые из литейной формы растворением или выжиганием. Исходным материалом является суспензионный или бисерный полистирол ПСБ для вспенивания, изготавливаемый в виде гранул, в замкнутых ячейках которых содержится порообразователь (легкокипящий компонент).

Бисерный полистирол (ПСБ) марок А₁, А₂, Б и В поставляется Горловским химкомбинатом (г. Горловка, Украина) и Кусковским химзаводом. Вспениванием бисерного полистирола (предварительным и окончательным) можно изготавливать плиты и другие заготовки пенополистироловых моделей практически любого размера, а также в специальных пресс-формах – модели с объемной массой $0,015...0,065 \text{ г/см}^3$.

В качестве сырья для изготовления моделей целесообразно использовать полистирол марки ПСБ-А₁ вследствие наименьшей объемной массы его во вспененном состоянии, более однородного зернового состава и наименьшего содержания мономера. Свойства пенополистирола приведены в табл. 1.

Поставляемые плиты обычно имеют объемную массу $0,025...0,040 \text{ г/см}^3$. Однако для литейных целей можно изготавливать из гранул полистирола ПСБ-А₁ плиты объемной массой $0,015...0,025 \text{ г/см}^3$. Пенополистироловые плиты изготавливают обычно автоклавным способом. Предварительное вспенивание гранул ПСБ можно осуществлять в различных теплоносителях. Наиболее распространено предварительное вспенивание в горячей воде (ваннах) и паром на специальных установках. Обязательным условием предварительного вспенивания исходных гранул является их непрерывное механическое перемешивание для обеспечения более равномерной те-

пловой обработки гранул и предупреждения слипания гранул в комки. Зависимость объема V вспененных гранул от размера исходного (бисерного) полистирола, температуры и продолжительность вспенивания наглядно прослеживается на рис. 1. Предварительное вспенивание можно производить в ваннах при температуре воды 95...100 °С в течение 1...10 мин в зависимости от размера исходных гранул и требуемой насыпной массы гранул. Предварительное вспенивание можно также осуществлять паром при 100...110 °С. На выбор температуры пара влияют размеры гранул, молекулярный вес исходного полистирола и содержание в нем остаточного стирола.

Таблица 1

Свойства пенополистирола

Свойство	Марка полистирола			
	ПСБ-А ₁		“Exsporit”	“Polystyrolshaum”
Объемная масса, г/см ³	0,020	0,030	0,015...0,020	0,020
Предел прочности, кг/см ² :				
при сжатии	1,8...1,5	2,0...2,5	0,9...1,1	1,0...1,2
при растяжении	1,8...2,0	2,6	2,1...3,3	–
при статическом изгибе	1,3...1,5	2,0...2,5	3,0...3,5	1,2
Ударная вязкость, кг·см/см ²	1,0...0,3	0,3	0,1...0,4	–
Коэффициент теплопроводности, ккал/(м·ч·град)	0,025(+20 °С)	0,027(+20 °С)	0,038(+50 °С)	0,027(0 °С)
Теплостойкость, °С	70...80	70...80	70...80	70...80
Коэффициент диэлектрических потерь (или tg σ)	0,000 1...0,000 2	0,0001...0,000 2	0,000 2	–
Водопоглощение, об. %:				
за 7 суток	0,24...2,35	0,24...2,35	–	–
за 8 суток	–	–	2...3	–
за 1 сутки	–	–	–	1

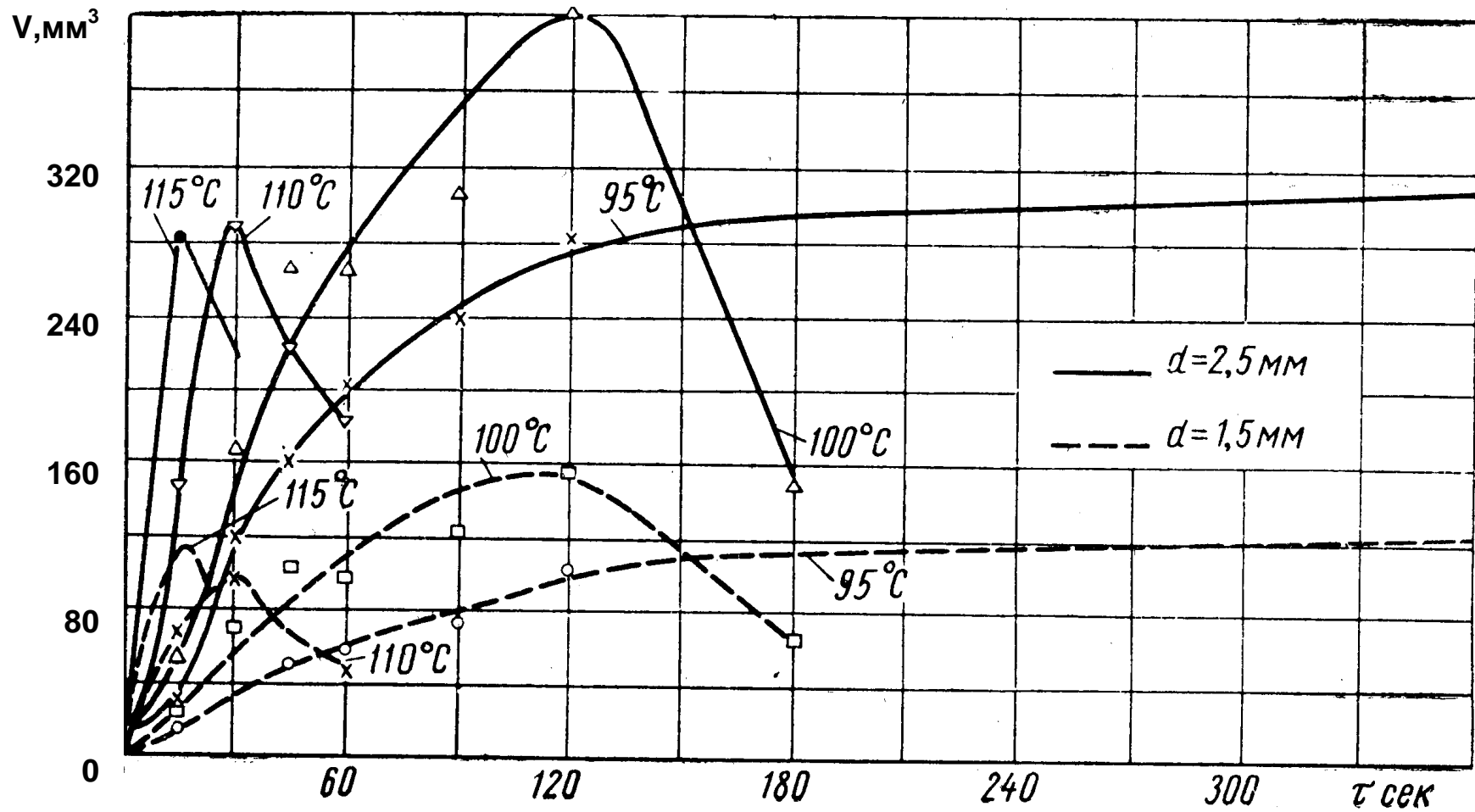


Рис. 1. Зависимость объема V вспененных гранул от размера гранул исходного (бисерного) полистирола, температуры и продолжительность вспенивания

Рис. 1. Зависимость объема V вспененных гранул от размера гранул исходного (бисерного) полистирола, температуры и продолжительности вспенивания

3. ИЗГОТОВЛЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ИЗ ПОЛИСТИРОЛА

Как уже отмечалось, модель из полистирола изготавливают в пресс-формах или вырезают из пенопласта. Рассмотрим эти способы изготовления моделей.

3.1. Изготовление моделей в пресс-формах

Перед началом работы пресс-форму необходимо смазать разделительной смазкой. Из значительного числа применяемых смазок лучшими являются раствор СКТ, силиконовая жидкость № 5, глицерин, смазка ЦИАТИМ. Одесским ЦПКБ рекомендуется использовать в качестве разделительного слоя мыльную эмульсию (25 г талька и 25 г хозяйственного мыла на 1 л воды). Эмульсия наносится на поверхность пресс-формы перед каждой операцией изготовления моделей.

Смазка из 4...10 %-го раствора синтетического термостойкого каучука (СКТ) в уайт-спирите, а также 5 % силиконовой жидкости, часто применяемой в качестве разделительного покрытия модельной оснастки при литье в оболочковые формы, хорошо удерживается на поверхности пресс-формы, что позволяет наносить ее периодически, после изготовления 10...15 моделей и более.

Пресс-формы желательно заполнять предварительно вспененными гранулами полностью простой засыпкой или вдуванием с помощью специальных дутьевых головок. Полнота заполнения пресс-форм гранулами зависит от давления воздуха в системе и расположения перфорации в стенках пресс-форм. Обычно давление воздуха составляет 2...3,5 кг/см² и выбирается опытным путем.

3.1.1. Методы вспенивания полистирола

Существуют различные методы вспенивания полистирола в пресс-формах. Рассмотрим некоторые из них.

Ванный метод вспенивания. При ванном методе окончательное вспенивание гранул пенополистирола производится путем выдержки заполненных ими пресс-форм в горячей воде. По сравнению с другими методами изготовления пенополистироловых моделей в пресс-формах ванный наиболее простой, так как при его применении не требуется дорогого и сложного специального оборудования.

Автоклавный метод вспенивания. В автоклавном методе в качестве теплоносителя используют перегретый водяной пар (110...115 °С), вводимый под давлением 1,3...1,45 кг/см². Пресс-формы, заполненные предварительно вспененными гранулами, помещают в автоклав и выдерживают до окончания процесса вспенивания полистирола. Продолжительность выдержки обычно выбирают опытным путем. Так же как и при ванном методе, продолжительность окончательного вспенивания повышается с увеличением толщины изготавливаемой модели, а также стенок пресс-форм; для модели толщиной стенки до 100 мм продолжительность вспенивания составляет 20...30 мин.

Метод теплового удара. Этот метод заключается в следующем: теплоноситель, обычно перегретый водяной пар с температурой 105...115 °С, вводится непосредственно в пресс-форму, заполненную предварительно вспененными и выдержанными на воздухе гранулами ПСБ. Проходя между гранулами, пар нагревает их практически одновременно по всему объему полости пресс-формы, что видно из данных о нагреве и охлаждении центральной зоны и поверхности модели.

Нагрев гранул токами высокой частоты. Заполненные гранулами пресс-формы помещают в поле высокочастотного конденсатора. Степень

нагрева токонепроводящих материалов в электрическом поле высокой частоты определяется их диэлектрической проницаемостью. Энергия переменного электрического поля благодаря диэлектрическим потерям материала превращается в тепловую энергию. Пенополистирол имеет низкое значение тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg } \sigma = 0,0001$), поэтому практически не нагревается в электрическом поле высокой частоты. Для повышения $\text{tg } \sigma$ используют различные добавки, например предварительно вспененные гранулы смачивают водой, количество которой составляет 4...6 г/дм³, в некоторых случаях 8 г/дм³. В целях еще большего увеличения тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg } \sigma$ в воду иногда добавляют соли и другие вещества. Тонкий слой воды или раствора на поверхности гранул пенополистирола при воздействии на него высокочастотного электрического поля нагревается, а образующиеся при этом пары воды разогревают гранулы.

3.1.2. Особенности конструкции пресс-формы

Материалом пресс-форм для пенополистироловых моделей может служить сталь, алюминиевые, медные и некоторые другие сплавы. Пресс-формы можно также изготавливать из пластика и стеклопластика с наполнителями, повышающими их теплопроводность. Температура размягчения пластика должна быть выше 150 °С. Общим требованием ко всем материалам является высокая теплопроводность, стойкость против коррозии при контакте с теплоносителем (водой, паром, паровоздушной смесью), достаточная механическая прочность и минимальная адгезия при контакте с пенополистиролом. Стальные пресс-формы следует хромировать для предупреждения коррозии. Пресс-формы для ванного, автоклавного методов и метода теплового удара вспенивания гранул изготавливают из различных алюминиевых сплавов, наиболее приемлемых по теплофизическим свойст-

вам и коррозионной стойкости. Пресс-формы для высокочастотного нагрева должны обязательно выполняться из токонепроводящих материалов.

В целях снижения содержания влаги в пенополистироловых моделях при ванном и автоклавном вспенивании гранул желательно выполнять в пресс-формах перфорацию в виде отверстий диаметром 0,5... 2,0 мм, с шагом 30...100 мм, в зависимости от размеров пресс-формы и требований к качеству поверхности моделей. Щелевые отверстия вент, устанавливаемых на поверхностях, перпендикулярных к разъему пресс-формы, желательно ориентировать в направлении выема модели для облегчения ее извлечения из пресс-формы.

3.2. Изготовление моделей из пенопласта механической обработкой

Модели для литья по газифицируемым моделям могут быть изготовлены любым цехом, производящим постоянные деревянные модели, так как пенополистирол легко обрабатывается вручную и на деревообрабатывающих станках.

На станках из пенополистироловых плит выполняют отдельные простейшие конструктивные элементы моделей, которые соединяют при сборке моделей склеиванием. Для резки пенополистирола рекомендуется использовать пилы с мелким или со сточенным зубом и заостренной режущей кромкой. Дисковые и ленточные пилы применяют для распиливания блоков на заготовки. Пенополистирол может быть легко обработан на специальных установках, где режущим инструментом является электронагреваемая проволока, например, из нихрома. Обработка пенополистирола абразивным инструментом дает хорошее качество поверхности и практически не требует доводки. С помощью фигурных абразивных инструментов

можно выполнять различные поднутрения сложной конфигурации, отверстия и галтели.

Отделочные работы, доводку размеров, а также выполнение наружных литейных радиусов можно производить на шлифовальных станках. Отделку труднодоступных мест моделей следует производить вручную наждачной бумагой различных размеров. Поверхностные дефекты в виде вмятин, углублений в результате выкрашивания гранул, а также технологические отверстия, получившиеся во время механической обработки, можно устранить заклежкой тонкой малозольной бумагой. Дефекты на поверхности моделей можно заделывать восковыми составляющими, желатиной или малозольными самотвердеющими смолами, тонкой полихлорвиниловой клейкой лентой.

Галтели моделей выполняют различными способами, в зависимости от радиуса сопряжения стенок моделей и длины. Если радиус галтеля менее 5 мм, то его можно выполнить бумажной или полихлорвиниловой лентой. Если радиус галтели более 5 мм, его выполняют непосредственно в модели механической обработкой. Галтели радиусом, значительно превышающим 5 мм, целесообразно изготавливать в виде конструктивных элементов механической обработкой, вырезкой по шаблону горячей проволокой или вспениванием в специальных пресс-формах, а затем наклеивать на модель.

4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЛИТЬЯ ПО ГАЗИФИЦИРУЕМЫМ МОДЕЛЯМ

По моделям из пенополистирола изготавливается обычная литейная форма либо из сухого песка, либо из ферромагнитного материала с последующим помещением такой формы в магнитное поле на время ее заливки жидким металлом до окончания процесса кристаллизации, либо оболочко-

вая керамическая форма. Метод литья по газифицируемым моделям принципиально отличается от других методов литья тем, что модель остается в форме и газифицируется при заливке металлом. Это предопределяет особые условия формирования отливки.

4.1. Условия формирования отливки

Формирование отливки происходит в результате взаимодействия формы, металла и модели. Модель даже из легкого поропласта существенным образом изменяет процессы теплообмена системы металл-форма. Это подтверждается практикой применения данного метода, например, образование на поверхности отливки такого дефекта, как ужимины. При получении отливок могут образоваться дефекты вследствие взаимодействия расплава с продуктами газификации модели. Это – блестящие пленки углерода и глубокие раковины, заполненные сажей, на чугунных отливках, рыхлоты и спаи на поверхности отливок из алюминиевых сплавов, цементация поверхностного слоя в стальных отливках и т. д. В результате образующейся газовой фазы, а следовательно, и газового давления в самой полости формы замедляется скорость заливки ее металлом.

4.1.1. Термическая деструкция пенополистирола

Пенополистироловая модель при заливке разрушается, и продукты этого процесса удаляются из формы газовым потоком. Процесс разрушения модели в форме сложен, характеризовать его только как газификацию было бы неправильно, хотя сам термин «газифицируемые модели» прочно вошел в терминологию литейного производства.

В процессе нагрева в полистироле происходят фазовые, а затем и химические превращения. При 164 °С он плавится, при 316 °С разлагается,

а при 576 °С горит и разрушается до водорода и углерода. Процесс термического разрушения полистирола, являющегося твердой основой модельного материала, подчиняется законам теплообмена и зависит как от мощности источника тепловой энергии и начальных условий окружающей среды (газового состава атмосферы и давления), так и от теплофизических констант самого вещества (теплоемкости, теплопроводности и температуропроводности). На механизм и кинематику процессов термического разрушения будут влиять также химические и фазовые превращения, происходящие при нагреве вещества.

Деструкция полистирола в условиях медленного нагрева. При медленном нагреве до температуры выше 80 °С пенополистирол размягчается настолько, что пары порообразователя прорывают стенки формы и улетучиваются, в результате чего пенополистирол постепенно уменьшается в объеме более чем в 40 раз. При дальнейшем нагреве пенополистирол теряет весь порообразователь и воздух и по существу превращается в полистирол, который не имеет определенной точки плавления, однако около 164 °С полностью переходит в жидкое подвижное состояние; при этом его молекулярный вес остается постоянным.

При термической деструкции полистирола в условиях вакуума и температурах нагрева до 350...420 °С происходит выделение четырех фракций. Самая летучая фракция состоит из окиси углерода, образующейся в результате взаимодействия полистирола с адсорбированным кислородом. Две следующие фракции имеют одинаковый молекулярный вес (263...264), но обладают различными структурами и летучестью. Первая фракция летуча как при температуре реакции (350...420 °С), так и при комнатной температуре (20 °С). Она состоит из 92...96 % стирола (мономера), 4...8 % толуола и содержит следы этилбензола и метилстирола. Вторая фракция летуча только при температуре реакции; в ее состав (наря-

ду с мономером стиролом) входят димер (19,32 %), тример (23,08 %) и тетрамер (3,85 %). Четвертая жидкая фракция нелетуча и состоит из осколков полимерной цепи с молекулярным весом около 2 000.

Условия опыта не дали произвести полный анализ продуктов деструкции пенополистирола, однако было установлено, что при 1 000 °С газотворность пенополистирола составляет 105 см³/г, а негазифицируемый остаток 0,015 % общей массы.

По данным исследований методом термического дифференциального анализа пенополиуретана и фенольно-резольного пенопласта эти пенопласты образуют большой негазифицируемый остаток (14 и 44 % соответственно) и обладают высокой газотворностью (730 и 600 см³/г при 1 000 °С), а поэтому малопримемлемы для изготовления газифицируемых моделей.

Деструкция полистирола в условиях высокотемпературного теплового удара. Анализ продуктов деструкции приведен в табл. 2. По данным хроматографического исследования газа в процессе деструкции полистирола при температуре 800 °С газ состоит из 25,8 % CH₄; 14,6 % C₂H₄; 2,6 % C₃H₆. Выделение газа при 800...1 200 °С происходит с постоянной скоростью, количество его возрастает пропорционально температуре.

Таблица 2

Анализ деструкции полистирола

Температура печи, °С	Выход газа, см ³ /г	Состав газа, об. %			Выход, вес. %		
		C _n H ₂	H ₂	CH ₄	газа	жидких продуктов	коксового остатка
800	165	20,5	37	34,6	11,1	70,8	18,1
	175	20,8	35,5	35,4	12,0	70,4	17,5
1 000	500	2,5	74,3	19,3	15,1	23,5	61,4
	518	2,4	71,4	21,7	14,8	27,2	58,0
1 200	738	1,5	82,3	9,3	18,5	16,5	65,0
	689	1,3	82,3	10,2	16,3	18,9	64,7

Удельная скорость газовыделения зависит от массы образца полистирола и определяется температурой среды. Например, для навески 0,53 г при 1 000 °С удельная скорость газовыделения составляет 14,6 см³/(г·с), при 1 200 °С 29 см³/(г·с).

Таблица 3

Газотворность пенополистирола марки ПСБ при высокотемпературном ударе

Температура, °С	Газотворность, см ³ /г	Температура, °С	Газотворность, см ³ /г
450	25	1 300	300
750	40	1 550	500...600

Газотворность пенополистирола зависит от температуры деструкции. В табл. 3 приведены значения газотворности пенополистирола марки ПСБ при высокотемпературном ударе, а в табл. 4 – его состав в зависимости от температуры жидкого металла.

Таблица 4

Зависимость состава газа при разложении пенополистирола от температуры металла при заливке

Составляющие	Силумин 700 °С	Чугун 1 350 °С	Сталь 1 550 °С
	Состав, об. %		
CO ₂	1,2	1,0	0,6
C _n H _{2n}	Нет	13,2	6,0
O ₂	19,2	6,6	5,0
CO	0,2	6,0	6,2
H ₂	0,6	32,8	48,0
CH ₄ + C ₂ H ₆	Нет	9,4	7,4
N ₂	78,8	31,0	26,8

4.1.2. Газовый режим литейной формы

В любой разовой литейной форме можно различить два периода газового режима.

Первый период газового режима литейной формы определяется продолжительностью заливки формы металлом. Газовая фаза в полости формы активно воздействует на зеркало жидкого металла. При этом в за-

висимости от состава газа могут происходить процессы окисления и восстановления на границе металл-газ, а также растворения и выделения различных газов.

Тепловое расширение газов, находящихся в полости формы, и газификация составляющих формовочной смеси определяют газовое давление в полости, которое противодействует гидростатическому напору металла, увеличивая продолжительность заливки. В этот период начинаются и химические реакции на границе металл-форма. Первый период газового режима мало изучен даже при литье в обычные песчаные (полые) формы.

Кинетика газовыделения при деструкции модели. Пенополистирол интенсивно деструктурирует в период заполнения формы $\tau_в$. Но и после окончания процесса заливки происходит газовыделение и даже его рост. Дальнейший рост газовыделения указывает на то, что летучие продукты деструкции пенополистирола конденсируются на стенках формы и по мере прогрева формы разлагаются, увеличивая ее газотворность. Таким образом, во второй стадии газового режима необходимо учитывать, кроме газотворности стержня (формы), дополнительную газотворность от разложения продуктов конденсации полистирола.

Эмпирическое уравнение газовыделения:

$$Q = aF\tau_3^m,$$

где Q – объем выделившихся газов, см³; a – относительный коэффициент газовыделения; F – площадь поверхности взаимодействия между металлом и моделью, см²; τ_3 – продолжительность заливки, с.

Относительный коэффициент газовыделения определяет объем выделившихся газов с единицы поверхности модели в единицу времени в результате взаимодействия металла и модели в полости формы $a=1$ см³/(см²·с). Зависимость коэффициентов газовыделения a , m от скорости подъема металла в полости формы можно проследить на рис. 2.

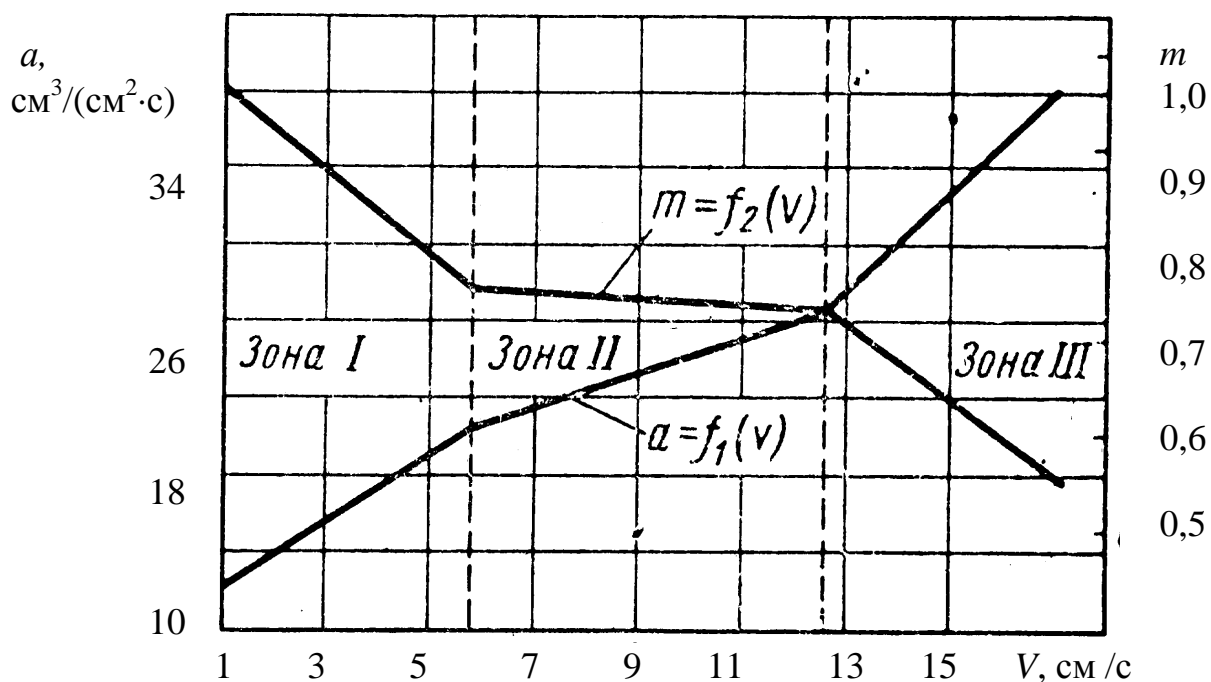


Рис. 2. Зависимость коэффициентов газовыделения a, m от скорости подъема металла в полости формы

Между металлом и моделью образуется зазор, где формируется газовая фаза продуктов деструкции полистирола. Величина зазора зависит от температуры металла, объемной массы модели и ее теплофизических констант, гидравлических свойств формы скорости подъема металла в полости.

При взаимодействии модели из пенополистирола с расплавленным металлом она разлагается с образованием газовой, жидкой и твердой фаз; назовем эти фазы первичными. Жидкая фаза под действием высокой температуры деструктурирует с постоянной скоростью, образуя вторичные газовую и твердую фазы. Вторичная газовая фаза состоит в основном из водорода, метана и летучих осколков разложения пенополистирола в виде стирола и его производных с малым молекулярным весом. Вторичная твердая фаза, как и первичная, состоит из сажистого углерода и коксового остатка. Летучие продукты при температуре материала формы будут конденсиро-

ваться в ее порах, образуя вторичную жидкую фазу, которая отличается от первичной своим меньшим молекулярным весом.

Так как скорость разложения пенополистирола на летучие (вторичные и первичные) и твердую фазу вполне определенная, то она может быть больше, меньше или равна расчетной скорости подъема металла в полости формы.

При увеличении расчетной скорости подъема металла скорость разложения пенополистирола начинает отставать от подъема металла, поэтому на зеркале металла скапливается жидкая фаза, но она по-прежнему будет успевать разлагаться в зазоре. В то же время наличие жидкой фазы на зеркале металла расширяет площадь взаимодействия между моделью и металлом, что увеличивает скорость и количество образования газообразных продуктов разложения (рис. 3).

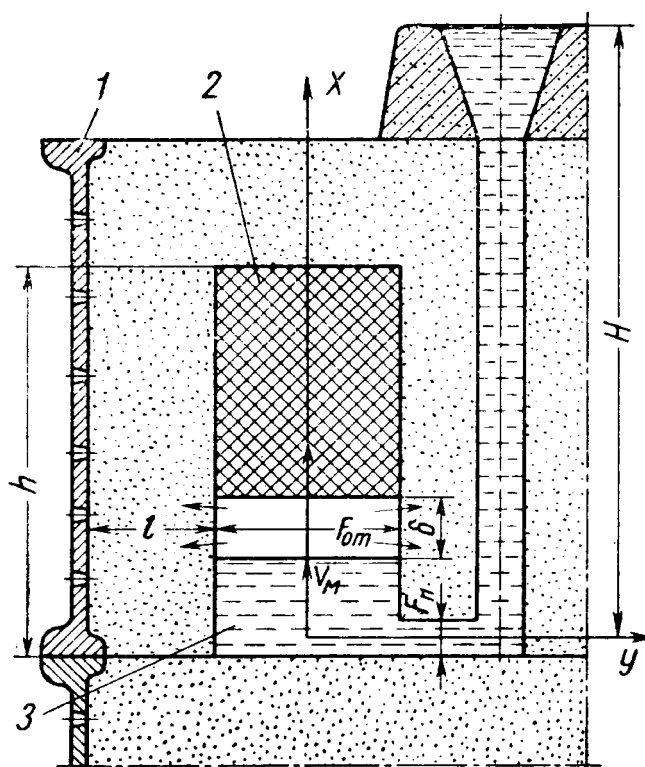


Рис. 3. Схема взаимодействия металла и модели в форме:
1 — опока; 2 — модель из пенополистирола; 3 — металл

В зоне контакта модели и металла в полости формы возникает газовое давление, от которого зависит фактическая скорость заливки формы. Эта скорость значительно отличается от скорости, определенной на основании расчета продолжительности заливки поллой формы.

Второй период газового режима литейной формы начинает развиваться в первом периоде и особенно интенсивно после окончания заливки формы металлом, когда происходит кристаллизация отливки и ее охлаждение. В этот период развиваются процессы химического взаимодействия между газами и поверхностным слоем кристаллизующейся отливки, которые носят в основном диффузионный характер. Второй период достаточно хорошо изучен для литья в обычные разовые формы.

При литье по газифицируемым моделям второй период представляет опасность из-за образования газовых дефектов в отливках. Появляется опасность образования газовых дефектов, особенно в толстостенных отливках, так как к концу заливки на границе металл-форма не успевают образоваться корочка металла. Опасность образования газовых дефектов усугубляется еще тем, что к общей газотворности смеси прибавляется газотворность сконденсированных в стенках формы продуктов разложения модели. Мощность газообразования в форме (стержне) пропорциональна прогреву формы (стержня), а так как распределение тепла описывается законом квадратного корня, то мощность газовой выделения пропорциональна квадратному корню.

4.2. Взаимодействие продуктов разложения пенополистирола с металлом

При малой газопроницаемости формы чугун незначительно насыщается углеродом деструкции полистирола. Особенно это заметно в нижней

части отливки, в месте подвода металла, т. е. в тот период, когда движение металла еще не установилось и происходит захватывание металлом жидкой и твердой фаз продуктов разложения модели. Углерод разложения пенополистирола, диффундируя в жидкий чугун, выступает как готовые центры графитизации, что ведет к укрупнению и изменению формы графита в структуре отливки.

Таким образом, для сохранения физико-механических свойств отливок из чугуна необходимо применять высокогазопроницаемые смеси.

Газовая и твердая фазы в еще большей степени оказывают влияние на структуру стальных отливок, особенно на поверхностный слой. Как отмечалось ранее, твердая фаза деструкции пенополистирола состоит из углерода. Чем выше температура среды, тем больше образуется твердой фазы, ибо глубина распада молекул стирола увеличивается. При заливке стальной формы с моделью из пенополистирола углерода образуется значительно больше, чем при заливке чугуном. Твердая углеродистая фаза взаимодействует со сталью в уже расплавленном состоянии. В процессе фильтрации газового потока в поверхностном слое формы задерживаются твердые частицы углерода, а также адсорбируются летучие фракции деструкции полистирола, которые по мере нагревания частично разрушаются до углерода и водорода, а частично перемещаются и конденсируются в более глубоких, холодных слоях формы.

Таким образом, стальная отливка к моменту кристаллизации окружена плотным слоем высокоактивного карбюризатора и восстановительной газовой атмосферой, постоянно выделяющей атомарный углерод. Высокая температура и высокое качество карбюризатора создают хорошие условия для науглероживания поверхностного слоя отливки.

В настоящее время еще недостаточно исследовано влияние продуктов деструкции модели на физико-механические свойства отливок из алю-

миниевых и медных сплавов. Можно предполагать, что данный метод не влияет на структуру и механические свойства отливок из алюминиевых сплавов, по крайней мере не снижает их качества, так как при температурах заливки алюминия полистирол разлагается в основном до летучих паробразных жидких фракций и образует очень мало газообразных продуктов.

4.3. Влияние продуктов разложения модели на качество поверхности отливок

Влияние продуктов разложения пенополистирола на формирование поверхности отливки зависит от температуры заливки и вида металла, гидравлических свойств формы и газового режима и т. д.

Чугун. При получении чугунных отливок продукты разложения модели оказывают двойное действие. Твердая фаза, состоящая из углерода, в случае равномерного отложения на стенках формы предохраняет отливки от пригара. Восстановительная газовая фаза, являясь источником выделения твердого углерода в результате разложения углеводородов под действием высокой температуры, также уменьшает пригар на отливках. В то же время грубые локальные отложения углерода способствуют образованию раковин на поверхности отливки, а скопление жидкой фазы – образованию волнистой поверхности, газовых раковин и дефекта типа *выпот*.

При температурах 650...1 000 °С из газовой фазы выпадает блестящий углерод, имеющий мелкокристаллическую структуру, сажистый углерод и кокс. Блестящий углерод обладает огнеупорностью несколько ниже серебристого графита, но выше сажистого углерода. Он не смачивается металлом. При толщине пленки 0,1 мкм он плотно удерживается на зернах песка и таким образом предохраняет отливку от пригара. Отливки из чугуна, полученные по моделям из пенополистирола, как правило, покрыты пленками блестящего углерода. Исследования показали, что из газовой и

жидкой фазы выделяется черный сажистый углерод, который, соприкасаясь с металлом, при высоких температурах 800...1 200 °С переходит в форму блестящего углерода. При значительном скоплении сажистого углерода на поверхности отливки под ним всегда располагается пленка блестящего углерода, причем пленки тем толще, чем больше скопление сажистого углерода и больше толщина стенки отливки. После удаления пленки и скоплений углерода с поверхности отливки обнаруживаются раковины различной глубины, чаще собранные в волнистую поверхность.

Если скорость разложения пенополистирола соизмерима со скоростью заливки формы металлом, то процесс разложения до летучих веществ и твердой фазы происходит в объеме зазора δ (рис. 3). Образующийся углерод увлекается газовым потоком и в зависимости от проницаемости смеси оседает на стенках формы или в более глубоких ее слоях. В первом случае на поверхности отливки появляется тонкий слой блестящего углерода, который не искажает поверхности и предохраняет ее от пригара. Во втором случае отливка будет без специфических дефектов, но возможен сильный пригар поверхности.

Если скорость заливки превосходит скорость разложения пенополистирола до летучих веществ, то жидкая фаза скапливается на зеркале металла. Углерод, образующийся в результате разложения жидкой фазы на зеркале металла, начнет скапливаться на его поверхности, коагулируя в крупные соединения. С другой стороны, процесс разложения жидкой фазы вызывает переохлаждение прилегающего слоя металла и его местную кристаллизацию. Эти локальные закристаллизовавшиеся участки в виде лунок, заполненные сажистым углеродом, при спокойном подъеме металла собираются в верхней части отливки, образуя дефекты. При наличии турбулентных потоков продукты деструкции модели собираются в какой-нибудь

части отливки, образуя волнистую поверхность, впадины между гребешками которой заполнены сажистым углеродом.

При дальнейшем увеличении скорости заливки формы на поверхности металла, особенно в первый момент заливки, образуется большое количество жидкой фазы, что вызовет значительное переохлаждение поверхностного слоя металла и образование прочной корочки, процесс накопления жидкой фазы на которой будет продолжаться. Под действием гидростатического напора металла корочка разорвется и отождется к поверхности формы, увлекая за собой скопившуюся жидкую фазу. В дальнейшем процесс накопления жидкой фазы может продолжаться, т. е. процесс образования твердой корочки и ее отжатие к поверхности формы может повторяться.

Сталь. Вследствие высокой температуры заливки стали глубина разложения пенополистирола значительно больше, чем при заливке чугуна. Однако из-за диффузии углерода в поверхностные слои стальной отливки поверхностные дефекты, подобные дефектам на чугунных отливках, не образуются. При очень быстрой заливке и низкой газопроницаемости формы на отливке появляются мелкие газовые раковины как результат воздействия газовой фазы деструкции полистирола.

Алюминиевые сплавы. При правильной технологии заливки в высокогазопроницаемые формы на отливках из алюминиевых сплавов следов взаимодействия продуктов деструкции с поверхностным слоем отливки не наблюдается.

В зоне контакта модели и алюминиевого сплава температура не превышает 500 °С, поэтому разложение модели происходит до жидких составляющих, летучих при температуре контакта и при небольшом количестве продуктов горения CO и CO₂. Твердой фазы при разложении полистирола не образуется.

Если скорость заливки превышает скорость продвижения фронта превращения, то жидкая фаза не успеет разложиться до летучих и собирается на поверхности отливки либо прижимается к вертикальной стенке, образуя местные дефекты. В результате переохлаждения металла в месте контакта с жидкой фазой образуются спаи, глубокие подкорковые раковины, обычно вытянутого типа. При получении алюминиевых отливок необходимо учитывать, что разложение полистирола до летучих идет с поглощением тепла, а реакции горения, которые компенсировали бы потери тепла, отсутствуют.

Наилучшие условия для формирования качественной отливки создаются в случае, если модель деструктурирует только до летучих (парообразных) продуктов, как в случае взаимодействия пенополистирола с алюминиевыми сплавами.

5. ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Модели из полистирола значительно упрощают технологический процесс получения отливок в разовых песчаных формах, начиная с его проектирования и кончая выбивкой отливок.

При проектировании на чертеж детали наносят только припуск на механическую обработку, конструкцию литниково-питающей системы и приводят размеры ее элементов.

При литье по газифицируемым моделям значительно облегчается работа модельщиков, упрощается и сокращается по времени процесс изготовления моделей. В большинстве случаев отпадает необходимость в изготовлении стержневых ящиков, в значительной степени упрощаются формовочные операции. Отпадают такие ответственные операции формовки,

как отделка разъема формы, удаление модели, отделка полости формы, установка стержней, жеребеек, кантовка форм, сборка форм и их контроль. Финишные операции также значительно сокращаются. Отсутствие стержней и линии разъема формы ликвидирует такую трудоемкую операцию, как обрубку заливов металла (облоя), различных технологических приливов. Операция обработки сводится к удалению литниковой системы, зачистке остатков литников с последующей дробеметной или дробеструйной обработкой отливки в камерах и барабанах.

Однако, несмотря на кажущуюся простоту технологического процесса, производство отливок по моделям из пенополистирола имеет свои особенности и трудности как в изготовлении моделей, так и в изготовлении форм.

Технологический процесс формовки по моделям из пенополистирола состоит из следующих подготовительных и производственных операций: выбора формовочной смеси и метода формовки; определения необходимости применения противопопригарного покрытия модели и его толщины; определения положения модели в форме в процессе ее заливки; выбора места подвода питателей, конструирования и расчета литниковой системы; выбора положения, конструирования и расчета прибылей, а также выпоров; расчета груза для формы, особенно в случае изготовления ее из сухого песка, без связующей добавки; определения температуры заливки формы металлом.

5.1. Выбор формовочной смеси и метода формовки

При выборе формовочной смеси и метода формовки необходимо учитывать низкую прочность материала и легкую деформируемость модели под действием внешних нагрузок, которые не должны превышать 1 кг/см^2 . Поэтому такие методы формовки, как встряхивание, прессование, формовка пескометом и др., неприемлемы для производства отливок по

моделям из пенополистирола. Даже формовку ручными простыми и пневматическими трамбовками нужно выполнять очень осторожно, чтобы не повредить модель. Лучше всего применять сыпучие или жидкоподвижные самотвердеющие смеси, не требующие дополнительного уплотнения или для уплотнения которых достаточна вибрация.

Формовочная смесь должна обеспечивать высокую газопроницаемость формы в пределах 200...500, обладать хорошей податливостью и выбиваемостью, а также высокой прочностью при слабом уплотнении как в холодном, так и в нагретом состоянии, сохранять свойства при многократном использовании. Затраты на регенерацию должны быть минимальные. Песчано-глинистая формовочная смесь не обладает всеми указанными свойствами, поэтому ее редко применяют для данного метода литья. Наибольшее применение находят различные самотвердеющие смеси. Их составы и свойства могут быть найдены в любом справочнике литейщика или специальной литературе.

Противопригарные покрытия. Одна из особенностей литья по газифицируемым моделям – это нанесение противопригарных покрытий на модель, так как форма не имеет разъема, а модель остается в форме в процессе заливки. Противопригарное покрытие выполняет две функции: защищает отливку от пригара (при заливке чугуна и стали) и предохраняет от образования грубой поверхности в результате неравномерного уплотнения смеси. Формы из наливных самотвердеющих смесей имеют равномерную плотность, однако из-за высокой пористости смеси необходимо применять противопригарное покрытие. Противопригарные покрытия должны удовлетворять следующим требованиям: 1) иметь высокую газопроницаемость; 2) обладать хорошей адгезией к материалу модели; 3) обладать способностью быстро высыхать и самоупрочняться на воздухе; 4) иметь высокую прочность. Для этого метода литья обычно рекоменду-

ются быстросохнувшие краски (табл. 5). Можно применять и обычные водные краски: типа ГБ–2 при литье чугуна, СТ-2, ЦБ — при литье стали и ТБ — цветных сплавов. После окраски модель выдерживается в течение суток. Краску наносят в несколько приемов с подсушиванием каждого слоя. В зависимости от массы отливок толщина противопопригарного слоя может колебаться от 0,3 до 2,5 мм.

Таблица 5

Состав быстросохнувших красок на основе поливинилбутираля

Цирконовый концентрат	Наполнитель			Поливинилбутираль	Гидролизованный спирт	Плотность, г/см ³	Литье
	Графит		Тальк				
	черный	серебристый					
—	35	10	—	2,5	52,5	1,10...1,25	Чугун
60	—	—	—	2,5	37,5	1,75...1,85	Сталь
—	—	—	42	2,5	55,5	1,08...1,1	Цветные

К примеру, завод Станколит для чугунного литья рекомендует краску, состоящую из 91,6 % аморфного графита, 5 % серебристого графита, 5,5 % древесного пека, 1,9 % поливинилбутираля, 11 % растворителя 646, 45 % гидролизованного спирта. Плотность готовой краски 1,14...1,16 г/см³.

5.2. Выбор положения модели в форме

Если принять количество выделившихся газов при разложении модели пропорциональным величине фронта превращения вещества $F_m \xi$ (где F_m – приведенная средняя площадь поперечного сечения модели, а ξ – глубина фронта превращения), то газы будут удаляться из зазора между металлом и моделью через площадь, образуемую периметром модели P_m и величиной зазора δ , т. е. величиной $P_m \delta$. Отношение

$$\frac{F_m \xi}{P_m \delta} = \lambda \quad (1)$$

характеризует отношение количества образующихся газов на единицу площади начала фильтрации. Эта величина названа напряженностью газового режима. Чем больше λ , тем больше продуктов разложения скапливается в зазоре δ ; в результате увеличивается опасность появления дефектов на поверхности отливок и вероятность изменения их физико-механических свойств. Для упрощения выражения λ можно предположить, что $\xi = \delta$, т. е. глубина фронта превращения модели равна зазору между моделью и металлом. Это допущение можно сделать также потому, что $\Pi_m \gg \delta$ и $F_m \gg \xi$; тогда

$$\lambda = \frac{F_m}{\Pi_m}. \quad (2)$$

Опыты показали, что чем меньше λ , тем качественнее получается отливка. Основное условие для определения положения модели в форме – это создание минимальной напряженности газового режима в форме. Модель нужно располагать так, чтобы отношение площади поперечного сечения ее относительно направления подъема металла в форме к периметру в этом сечении было минимальным. Это значит, что модель необходимо располагать вертикально в форме относительно большего размера или наклонно, что легко осуществимо при данном методе литья.

Рабочие поверхности отливки следует располагать в нижней части формы или вертикально. Положение модели в форме должно обеспечивать удобство подвода литниковой системы и установки прибылей.

5.3. Расчет и конструирование литниковой системы

При литье по газифицируемым моделям к литниковым системам предъявляют те же требования, что и при литье в разовые формы.

Расчет всякой литниковой системы основан на определении оптимального времени заливки формы металлом, которое можно найти исходя из условий оптимальной скорости подъема металла в полости формы:

$$\tau_{\text{зал}} = \frac{H}{v}, \quad (3)$$

где $\tau_{\text{зал}}$ – время заливки формы металлом; H – приведенная высота отливки; v – оптимальная скорость подъема металла в полости формы.

На основании проведенных экспериментов установлено, что оптимальная скорость подъема металла равняется 3...5 см/с при температуре заливки чугуна 1 320...1 380 °С и плотности модели из пенополистирола 0,018...0,024 г/см³. Большие значения скорости соответствуют меньшим сечениям отливки. Для отливок из стали оптимальная скорость должна быть выше, а алюминиевых – ниже. При очень быстрой заливке в отливке появляются газовые дефекты и неметаллические включения, а при медленной заливке – спаи и недоливы. При расчете элементов литниковой системы можно пользоваться традиционными формулами, учитывающими время заливки или скорость подъема металла в форме. Ю. А. Степанов [5, 6] предложил расчет узкого сечения литниковой системы при литье по газифицируемым моделям по формуле

$$F_{\text{пит}} = \frac{K\Pi_{\text{отл}}\rho_{\text{отл}}^2 H_p S_{\text{мод}} \cdot 2,56\sqrt{\alpha_{\text{мод}}\tau_{\text{зал}}}}{G_{\text{отл}}\rho_{\text{мод}}^2 g^2 \mu \sqrt{2gH_p}}, \quad (4)$$

где K – газопроницаемость формы; $\rho_{\text{отл}}$ и $\rho_{\text{мод}}$ – плотность отливки и модели соответственно; g – газотворная способность материала модели; $\alpha_{\text{мод}}$ – коэффициент теплопроводности модели; $G_{\text{отл}}$ – вес отливки; $\Pi_{\text{отл}}$ – периметр отливки в направлении, перпендикулярном движению расплава; $S_{\text{мод}}$ – поверхность модели; H_p – расчетный напор металла; μ – коэффициент расхода литниковой системы.

Чтобы избежать обильного дыма и копоти, необходимо перекрывать выпоры газопроницаемыми пробками. По мере заполнения выпора металлом пробка выдавливается им и открывает свободный выход металлу.

5.4. Подготовка формы к заливке металлом

Форма при данном методе литья не имеет разъема, однако она часто выполняется из нескольких опок. В полости формы в первый момент заливки развивается значительное давление газа, величина которого зависит от многих факторов. Если газовое давление превзойдет силу сопротивления формы разрыву, то может произойти выдавливание верха формы или ее разрыв в наиболее слабом месте. Поэтому форму необходимо нагружать. Разрыв формы можно предотвратить при соблюдении следующего условия:

$$p_{\phi}F_{\phi} < \sigma_{\text{в}}S_{\phi} + G_{\phi} + Q_{\Gamma}, \quad (5)$$

где F_{ϕ} – площадь модели в опасном сечении, см²; $\sigma_{\text{в}}$ – предел прочности на растяжение формовочной смеси, кг/см²; S_{ϕ} – площадь поперечного сечения формы без учета F_{ϕ} , см²; G_{ϕ} – вес формовочной смеси выше опасного сечения, кг; Q_{Γ} – вес груза, кг.

Из неравенства (5) определим вес груза:

$$Q_{\Gamma} = p_{\phi}F_{\phi} - \sigma_{\text{в}}S_{\phi} + G_{\phi}. \quad (6)$$

Давление p_{ϕ} газа в зазоре δ рассчитываем из выражения

$$p_{\phi} = \frac{amF_{\text{от}}T_{\phi}l\eta}{273\delta C\Pi} \left(1 - e - \frac{CT_{\text{з}}\Pi}{F_{\text{от}}T_{\phi}l\eta}\right) \tau^{m-1} \quad (7)$$

при времени заливки 1...5 с (в зависимости от габаритных размеров формы).

Значения коэффициентов a и m , характеризующих газовыделение, приведены в табл. 6, в других случаях эти коэффициенты находятся опытным путем; $F_{\text{от}}$ – площадь взаимодействия модели с формой, можно при-

нять как площадь поверхности отливки; T_{ϕ} – температура в зоне превращения; l – длина пути фильтрации газа; η – кинематическая вязкость газа; C – проницаемость формы в дарси; Π – периметр модели в зоне взаимодействия ее с металлом; T_{Γ} – температура газа в объеме зазора, К. В случае наличия в отливке поднутрений и других развитых частей, на которые действует подъемная сила металла, в формулу (6) необходимо ввести еще $\gamma_m H_p S'_{\phi}$:

$$Q_{\Gamma} = p_{\phi} F_{\phi} + \gamma_m H_p S'_{\phi} - \sigma_v S_{\phi} + G_{\phi}; \quad (8)$$

где H_p – гидростатический напор металла в опасном сечении, см; S'_{ϕ} – площадь сечения формы, подверженная действию подъемной силы металла, см².

Таблица 6

Значения коэффициентов газовыделения a и m при $T = 1350^{\circ}\text{C}$

Скорость подъема металла в форме, см/с		a , см/с	m
расчетная	фактическая		
4,0	3,43	17,2	0,824
5,85	5,06	21,3	0,755
12,5	5,56	26,3	0,735
17,3	8,9	37,6	0,553

6. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОТЛИВОК ПО ВЫЖИГАЕМЫМ МОДЕЛЯМ

Полистирол может иметь низкое качество и повышенную плотность. При этом обнаруживаются специфические поверхностные дефекты, ухудшающие товарный вид отливок. В этом случае целесообразно модель предварительно удалить из формы путем выжигания перед заливкой металла. Рассмотрим три основных способа выжигания модели из формы: а) нагревом в сушильной печи; б) ацетиленокислородным пламенем; в) струей кислорода.

На основании экспериментов было установлено, что при нагревании формы в сушильной печи время удаления модели пропорционально температуре; например, при 300 °С время полного удаления модели из формы составляет 4 ч, а при 500 °С – только 1 ч. Противопригарное покрытие, содержащее в качестве связующей основы гидролизованный раствор этилсиликата или жидкое стекло, отслаивалось от формы и растрескивалось. Поэтому указанный способ удаления модели можно рекомендовать только для получения отливок среднего развеса, формы которых можно выполнять повышенной плотности без противопригарного покрытия.

Выжигание ацетиленокислородным пламенем не дало положительных результатов. Наилучшие результаты были получены при выжигании моделей направленной струей кислорода. Стояк (выпор) из пенополистирола поджигают, и в очаг горения при помощи резака или трубки направляют струю кислорода. Модель быстро выгорает. Продолжительность удаления модели зависит от ее объема и составляет обычно 1...5 мин.

Так как выжигание сопровождается обильным выделением дыма, этот процесс необходимо проводить под вытяжным зонтом. Формы следует изготавливать из жидкостекольных самотвердеющих смесей. Огнеупорное покрытие из цирконового красителя, приготовленного на гидролизованном растворе этилсиликата, имело хорошую стойкость; противопригарное покрытие на жидком стекле отслаивалось, что связано с большой усадкой жидкого стекла.

6.1. Изготовление отливок в песчаных формах без связующего

При получении отливок в песчаных формах без связующего значительно упрощаются операции изготовления и выбивки формы, а их продолжительность резко уменьшается.

Система металл-модель-форма разбивается на ряд температурных зон:

- 1) зону испарения полистирола, где он превращается в газ;
- 2) зону соприкосновения металла со стенками формы или огнеупорным покрытием;
- 3) зону течения газа с образованием газового давления;
- 4) зону конденсации, здесь песок конденсирует пары модели.

На основании предложенной схемы считается, что песок в статическом состоянии поддерживается газовым давлением, образующимся в результате газификации модели, продуктами конденсации, которые связывают песок в более холодных его слоях, противопопригарным покрытием и, наконец, самим металлом вследствие его кристаллизации.

6.1.1. Механика песка

Согласно теории механики грунтов, песок является сыпучим телом, не имеющим сил сцепления между частицами, но обладающим силами внутреннего трения. Деформация неограниченной песчаной массы произойдет в том случае, если напряжение сдвига достигнет предельного напряжения. По закону Кулона между нормальным напряжением и напряжением сдвига существует следующее соотношение:

$$\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (9)$$

где τ – напряжение сдвига; σ – нормальное напряжение; φ – угол внутреннего трения.

В механике грунтов под напряжением подразумевается воздействие силы, отнесенной к единице площади, на плоскость сечения тела (рис. 4) $\operatorname{tg} \varphi$ является коэффициентом трения между частицами. Угол внутреннего трения песка обычно возрастает с увеличением его плотности, размеров, твердости и угловатости. Для круглого сухого песка плотностью 1,5 и 1,7 г/см³ угол внутреннего трения составляет соответственно 28,5 и 35°, для угловатого песка 34 и 46°.

Угол внутреннего трения чистых сухих песков близок по значению к углу естественного склона, который определяет положение свободного насыпного песка и не зависит от высоты засыпки.

Таким образом, песок как сыпучий материал в замкнутом объеме может выдерживать значительные нагрузки без деформаций, причем величина предельной нагрузки зависит от плотности песка и угла внутреннего трения.

Сжимаемость песка очень незначительна. Это объясняется тем, что реальные пески имеют разнообразную форму, значительно отличающуюся от круглой. В результате при свободной засыпке песчинки, заклиниваясь, будут создавать «арки» и «мостики», которые способны выдерживать сравнительно высокие статические нагрузки. Поэтому при приложении статических нагрузок песок практически не уплотняется.

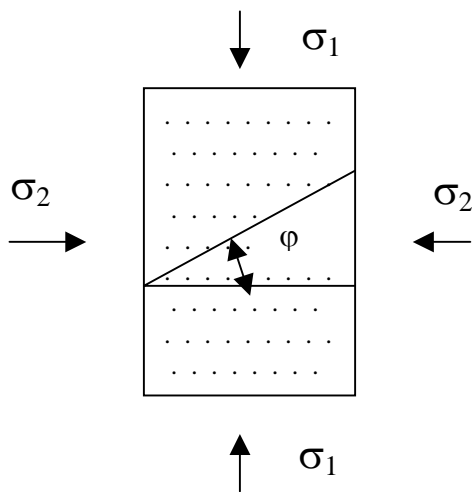


Рис. 4. Двухосное напряженное состояние песчаного грунта

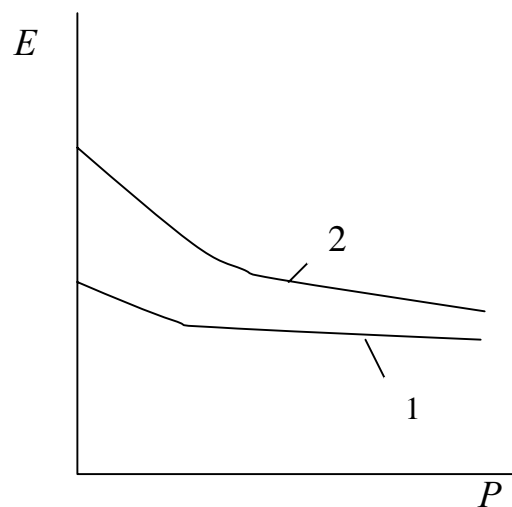


Рис. 5. График сжимаемости сухого песка и глины

На рис. 5 для сравнения приведены графики сжимаемости сухого песка 1 и глины 2. В случае же незначительной вибрации происходит значительное уплотнение песка за счет разрушения «мостиков» и «арок». Если в цилиндр засыпать песок и нагружать его сверху поршнем, то перемещение поршня не будет заметно и его можно зафиксировать только прибо-

рами. Если тот же цилиндр поместить на вибрационный стол, то объем песка значительно уменьшится. В результате вибрации или встряхивания объем песка уменьшится на величину, составляющую до 200 % первоначального объема после свободной засыпки.

6.1.2. Свойства других сыпучих огнеупорных материалов

В последнее время находят применение новые формовочные составы на основе оливинита, хромита, магнезита, циркона, силлиманита и некоторых других огнеупорных материалов.

Оливинитовые породы являются магнезиальными силикатами, имеющими общую химическую формулу R_2SiO_4 . Наибольшее распространение в настоящее время получил оливин $(Mg, Fe)_2SiO_4$ с температурой плавления 1 750...1 830 °С.

Хромит (хромистый железняк) применяют для приготовления облицовочных смесей и красок при стальном литье. Температура плавления хромита 1 450...1 850 °С. Чем меньше оксидов FeO содержится в хромите, тем выше температура его плавления. Хромистый железняк обладает хорошей огнеупорностью, не взаимодействует с оксидами железа, что обеспечивает чистоту поверхности отливки.

Магнезит $MgCO_3$ при обжиге разлагается; оставшийся MgO имеет температуру плавления 2 800 °С. На практике применяют металлургический магнезит, который содержит значительное количество других минералов, уменьшающих его температуру плавления.

Циркон $ZrSiO_4$ обладает высокими физическими и химическими свойствами. Температура плавления его 2 000 °С, коэффициент литейного расширения 0,5. Он не смачивается жидкими металлами, вследствие чего не образует пригара.

6.1.3. Теоретические основы получения отливок в форме из сухого песка

Основным фактором, удерживающим песок в статическом положении, являются фильтрационные силы газового потока, который создается в результате значительного давления в зазоре между моделью и металлом при их взаимодействии.

Основным параметром, позволяющим регулировать процесс, является скорость подъема металла в полости формы, которая определяет a , m , δ . При увеличении скорости заливки уменьшается зазор δ , следовательно, увеличивается p_f , но необходимо помнить, что скорость подъема металла не должна превосходить оптимальную.

Для сохранения равновесия песчаной основы в период фильтрации газа необходимым условием является плотность ее упаковки, в противном случае силы фильтрации, воздействуя на скелет песка, уплотняют его, что вызывает перемещение массы песка и нарушение равновесия системы. Фильтрационные силы потока не должны выдувать мелкие фракции, что также приведет к нарушению статического состояния. Однако стенки опоки должны быть газопроницаемыми, так как давление p_f очень быстро установится во всем объеме опоки и фильтрация газа прекратится.

При плотности песка $1,5 \text{ г/см}^3$ (форма не уплотнена) имеется вероятность нарушения равновесия системы металл-форма в сторону подутия отливки, в то время как при плотности песка $1,7 \text{ г/см}^3$ такая возможность исключена.

В конце заливки всегда существует опасность подъема верхнего слоя песчаной формы металлом, так как гидростатический напор металла всегда больше давления со стороны верхнего слоя песка. Особенно это относится к литью черных сплавов, плотность которых значительно превышает плотность песка. Поэтому необходимо нагружать верх формы применением ме-

таллических жестких крышек, которые препятствовали бы поднятию песка, но сами не производили бы давления на форму.

6.1.4. Особенности проектирования литниковой системы

При разработке литниковой системы необходимо особое внимание обращать на устранение разрежения в ее элементах при заливке металла. Наибольшая опасность разрежения создается в верхней части стояка, что всегда приводит к обвалу песка в нем из-за инъекции воздуха. Поэтому конструкция стояка должна выполняться с учетом всех требований, устраняющих разрежение.

Турбулентность металла в стояке является причиной разрушения песчаной стенки. Уменьшение турбулентности возможно только за счет снижения скорости металла в стояке и уменьшения диаметра стояка, что определяется временем заливки формы. Для отливок средних размеров на стояк необходимо наносить прочное керамическое покрытие; литниковую систему для крупных отливок нужно делать из керамических трубок.

Питатель менее подвержен разрушению, так как течение металла в питателе обычно ламинарное. Разрежение в питателе бывает только в местах резкого поворота. Следовательно, даже для крупных отливок питатель можно делать из пенополистирола. Однако места соединения питателя с отливкой должны выполняться плавными либо окрашиваться (покрываться керамической оболочкой).

Расчет площади сечения питателя производится по следующей схеме:

- 1) определяем положение модели в форме λ , характеристики применяемого песка γ_n , φ , параметры опоки и другие данные;
- 2) находим минимально допустимое газовое давление $p_{\text{доп}}$ в зазоре между металлом и моделью;

- 3) определяем время заливки формы исходя из оптимальной скорости подъема металла в полости формы;
- 4) находим коэффициенты газовыделения a и m и рассчитываем $p_{\text{ф}}$.

При $p_{\text{ф}} \geq p_{\text{доп}}$ определяем сечение питателей. Если $p_{\text{ф}} \geq p_{\text{доп}}$, то необходимо либо увеличить скорость заливки, либо изменить C , l и другие параметры и произвести повторный расчет.

Шаровые прибыли. Преимущество прибылей сферической формы известно давно, однако применение их до недавнего времени было затруднено вследствие значительной трудоемкости изготовления их в форме.

Процесс литья по газифицируемым моделям позволяет решить проблему широкого применения прибылей сферической формы. Модель прибыли, оставаясь в форме после удаления из нее постоянной модели, под действием расплава газифицируется.

Эти преимущества объясняются тем, что прибыли сферической формы имеют наилучший модуль затвердевания по сравнению с модулями затвердевания прибылей другой конфигурации при условии равенства объемов:

$$M = \frac{V}{S},$$

где M – модуль затвердевания прибыли; V – объем прибыли; S – охлаждаемая поверхность прибыли.

Прибыль сферической формы имеет в среднем относительную продолжительность затвердевания, на 30...60 % большую, чем прибыли другой конфигурации при условии равенства их объемов.

Заливку форм нужно производить особенно тщательно. Нельзя допускать разрыва струи металла во время заливки, а саму заливку следует осуществлять равномерно, при постоянном гидростатическом напоре. При

производстве мелких отливок форму заливают из-под пробки. Крупные формы должны заливать рабочие-заливщики высокой квалификации.

6.2. Получение отливок в магнитных формах

При литье в магнитные формы по пенополистироловым моделям вместо сухого песка используют сыпучий материал, который упрочняется под действием магнитного поля. Естественно, что этот материал должен быть магнитным. После засыпки пенополистироловой модели таким формовочным материалом накладывается магнитное поле, под действием которого частицы материала связываются в единое целое. Заливку производят как обычно. После снятия магнитного поля формовочный материал высыпается из опоки. Такой способ получения отливок сохраняет основные достоинства литья в формы из сухого кварцевого песка и в то же время устраняет его основной недостаток – образование засоров.

6.2.1. Поведение ферромагнитных частиц в постоянном магнитном поле

Известно, что силы, действующие на ферромагнитные частицы со стороны магнитного поля, возникают лишь в случае его неоднородности. Ферромагнитный шар, помещенный в однородное магнитное поле, будет покоиться, если на него не действуют силы других полей. Однако уже два ферромагнитных шара, находящихся в таком поле, притягиваются друг к другу, располагаясь вдоль силовой линии. Это объясняется тем, что ферромагнитные шары, находясь в однородном магнитном поле, намагничиваются сами и создают вокруг себя локальные неоднородные магнитные поля, которые и приводят к их взаимодействию. Чтобы оторвать друг от друга шары, необходимо приложить определенное усилие, величина которого зависит при прочих равных условиях от величины индукции магнит-

ного поля. Силы взаимодействия между шарами зависят и от угла ориентации линии, проходящей через центры шаров относительно направления магнитного поля α . При возрастании этого угла α сила притяжения F уменьшается, проходит через нулевое значение и дальше становится отрицательной. Это означает, что при определенных условиях, когда угол α близок к 90° , ферромагнитные шары отталкиваются друг от друга. Однако между шарами, составляющими, например, плотноупакованную систему, действуют лишь силы притяжения (рис. 6, а). Эти силы способны противостоять не только весу шаров, но даже определенным нагрузкам (рис. 6, б, в).

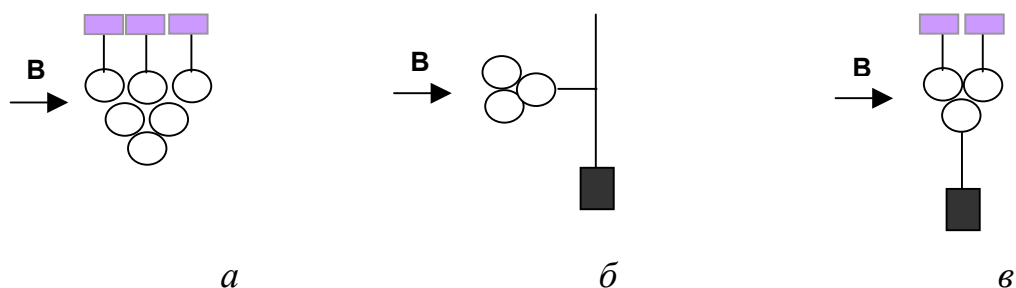


Рис. 6. Взаимодействие магнитных шаров в постоянном однородном магнитном поле

Очевидно, благодаря действию сил притяжения между частицами формы из чугуновой или стальной дроби приобретают прочность в однородном магнитном поле.

Если при помощи удаляемой модели из немагнитного материала в такой форме создать полость, то конфигурация сохранится. Это объясняется тем, что большие силы притяжения между ферромагнитными частицами, находящимися в магнитном поле, возникают лишь при непосредственном контакте. При увеличении расстояния между частицами силы притяжения значительно ослабляются (рис. 7). Поэтому частицы, оформляющие полость, фиксируются в определенном положении, не стремятся соединиться с более далекими частицами, находящимися на границе полости, благодаря чему сохраняется очертание полости формы.

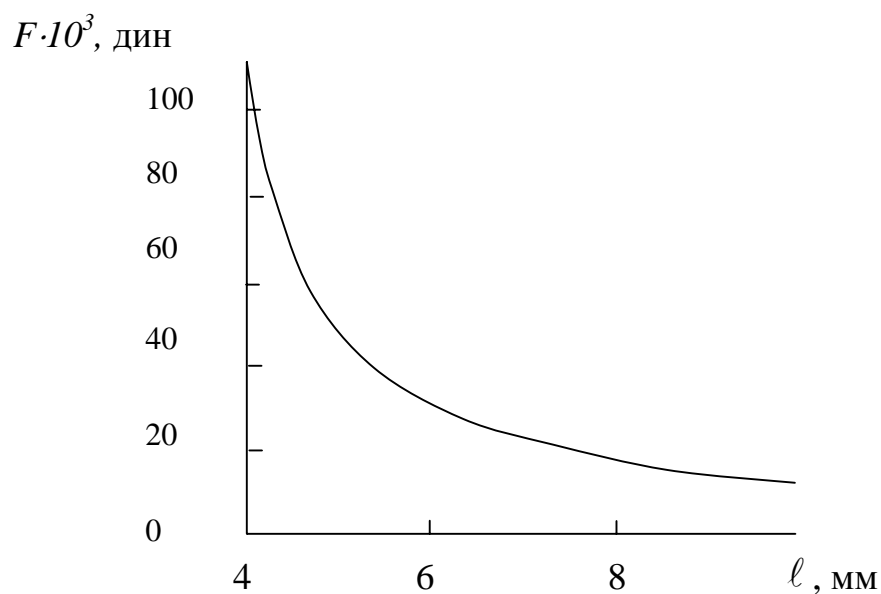


Рис. 7. Зависимость силы притяжения между центрами двух ферромагнитных шаров диаметром 4 мм, находящихся в постоянном магнитном поле ($H = 800$ А/м)

6.2.2. Свойства ферромагнитных формовочных материалов и магнитных форм

В качестве ферромагнитных формовочных материалов используют дробь стальную, колотую или литую (ДСК и ДСЛ) и чугунную, колотую или литую (ДЧК и ДЧЛ), железный порошок ПЖ (ГОСТ 11964-66 и 9849-61). Все эти материалы магнитомягкие, то есть при снятии магнитного поля их остаточная намагниченность практически становится равной нулю, а сыпучие свойства полностью восстанавливаются. Наглядно проследить изменение относительной магнитной проницаемости таких материалов можно по кривым на рис. 8.

С энергетической точки зрения для магнитной формовки более выгодны материалы, имеющие наибольшую величину магнитной проницаемости в рабочем диапазоне изменения напряженности магнитного поля.

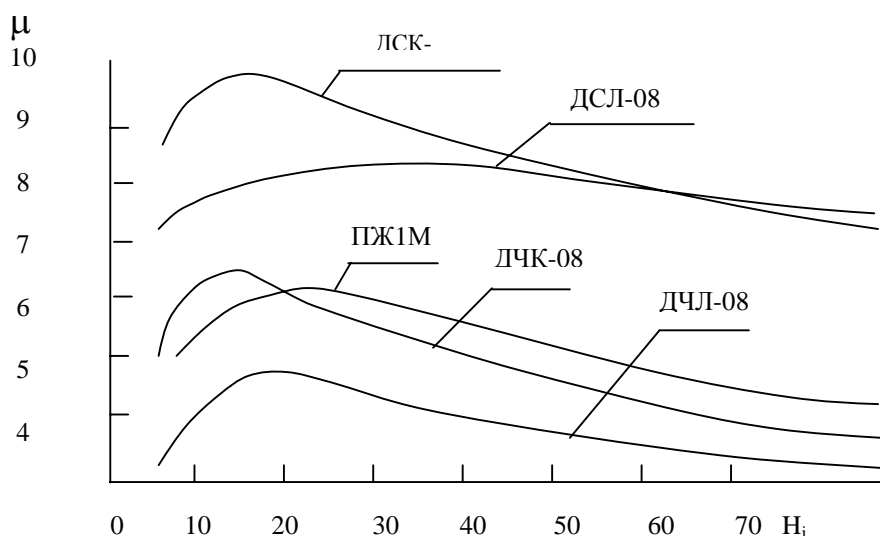


Рис. 8. Зависимость относительной магнитной проницаемости μ от напряженности поля H_i

Термофизические свойства

При контакте с расплавом материал магнитной формы быстро нагревается. При нагреве ферромагнитного материала до температур выше 600 °С форма начинает разупрочняться, а при достижении температур, близких к точке Кюри, разупрочнится полностью. Это можно проследить на примерах (рис. 9–10).

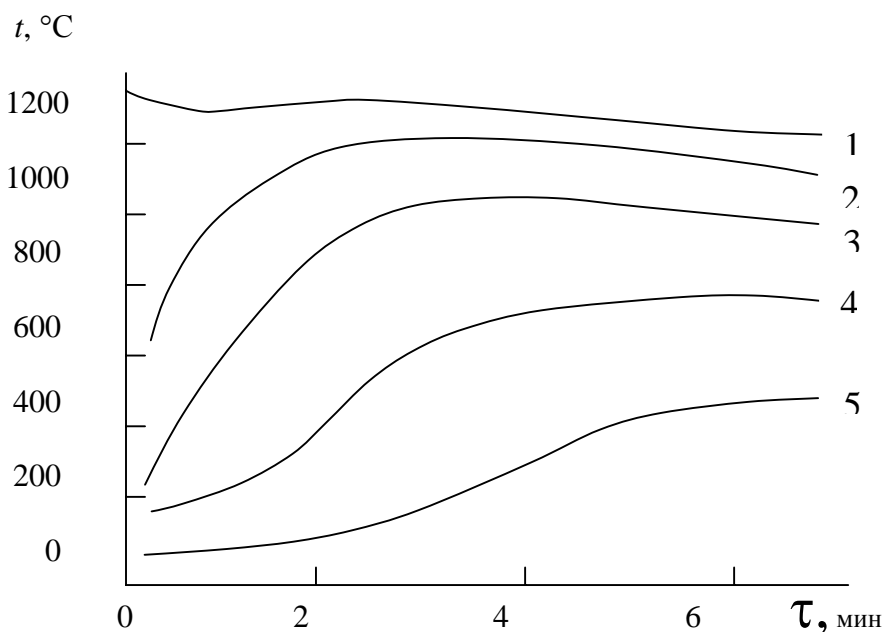


Рис. 9. Кривые распределения температуры в магнитной форме из дроби марки ДСК-08 при затвердевании чугунной плитки размерами 15x150x150:
 1 – на границе "отливка-форма"; 2 – на расстоянии 4 мм от поверхности; 3 – на расстоянии 8 мм;
 4 – 12 мм; 5 – 22 мм

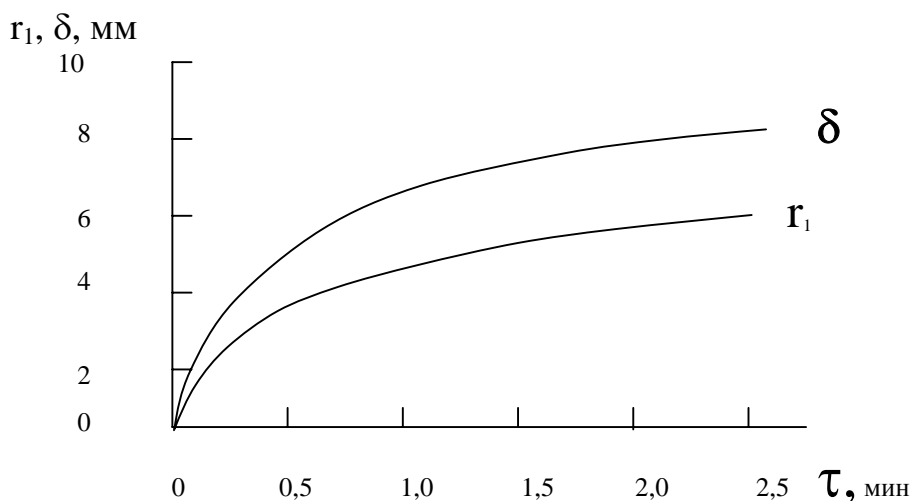


Рис. 10. Зависимость толщины корки отливки r и толщины разупрочненного слоя формы δ из ДСК-08 от времени затвердевания чугунной плитки размерами 15x150x150 мм

Из рис. 9 видно, как прогревается форма из дроби марки ДСК-08. Поэтому, до того как произойдет прогрев слоев формы, близких к поверхности отливки до температур точки Кюри, должна быть сформирована корка отливки достаточной толщины. На рис. 10 показано, как изменяются толщины затвердевшей корки отливки и разупрочненного слоя формы от времени.

Разупрочнение слоев формы, прилегающих к отливке, как правило, не приводит к браку отливок, так как разупрочненный слой оказывается зажатым между "монолитной" массой формы, сохранившей магнитные свойства, и коркой отливки, толщина и прочность которой быстро увеличиваются. При измерении твердости магнитной формы детали твердомера должны быть немагнитны.

На рис. 11 приведены кривые зависимости поверхностной твердости магнитных форм из различных материалов от индукции и от температуры, в котором кривые соответствуют следующим материалам: 1 – ПЖ1М; 2 – ДСК-08; 3 – ДЧК-08; 4 – ДСЛ-08; 5 – ДЧЛ-08. Установлено что при нагреве форм из порошка ПЖ1М до 900 °С на поверхности образуется твердая корка толщиной 5...10 мм в результате спекания порошка.

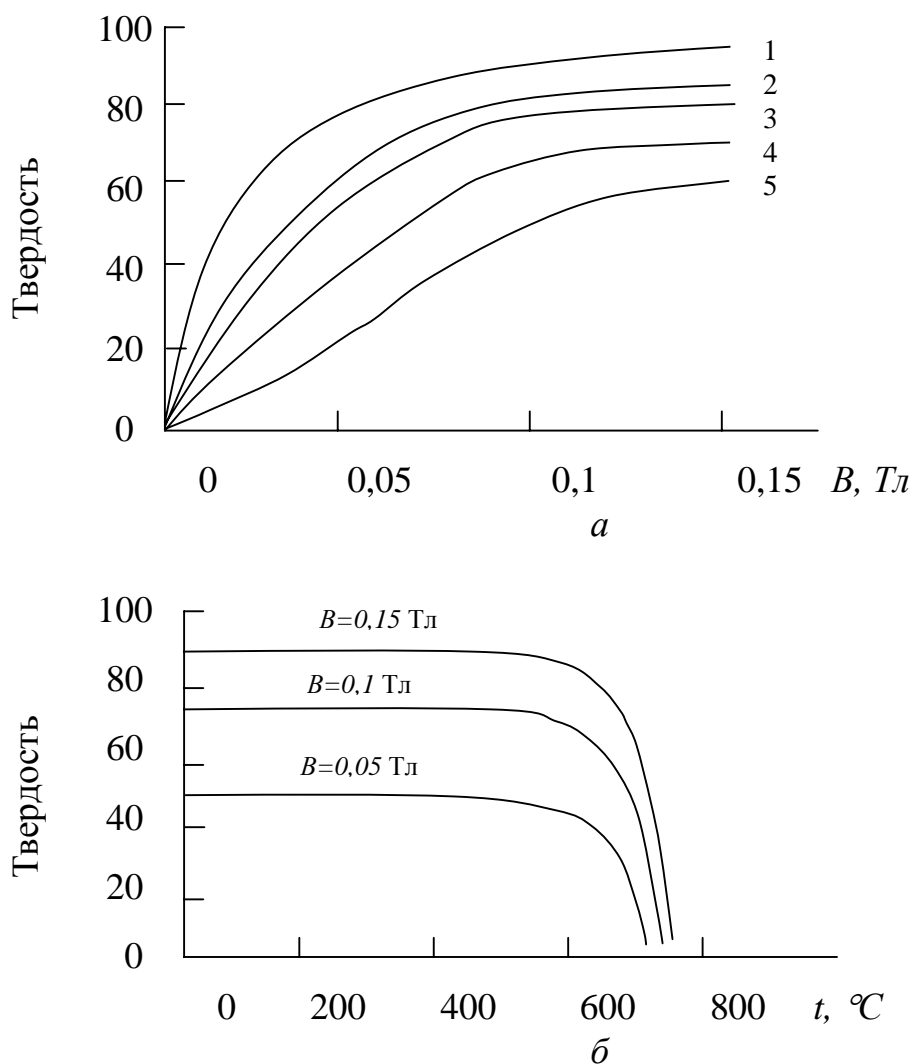


Рис. 11. Зависимость твердости магнитной формы от индукции магнитного поля (а) и от температуры ее нагрева (б)

Способность литейных форм противостоять воздействию металла характеризуется показанием твердости. Твердость магнитных форм зависит от величины индукции и направления магнитного поля, магнитной проницаемости материала, его формы и плотности укладки, а также степени засоренности другими материалами, температурного поля и др.

При повышении некоторого значения индукции магнитного поля, характерного для каждого материала, магнитная форма теряет свою устойчивость. Это явление выражается в том, что происходит *зарастание* полости формы, причем только со стороны поверхностей, перпендикулярных

магнитным силовым линиям. Заращение полостей в магнитной форме, наблюдаемое при увеличении индукции поля, можно объяснить тем, что в процессе формовки частицы ферромагнитного материала фиксируются в различных положениях.

При помещении материала в магнитное поле эти частицы поворачиваются длинными сторонами вдоль силовых линий. В относительно слабых магнитных полях возникающие моменты сил недостаточны для поворота частиц, так как этому препятствуют силы трения и силы сцепления, возникающие в результате притяжения частиц. При увеличении индукции магнитного поля момент сил возрастает и достигает значений, достаточных для преодоления сил сопротивления частиц. Первыми поворачиваются частицы, находящиеся у поверхности полости. Плотность упаковки частиц уменьшается, наиболее намагниченные частицы (крупные и удлиненные) притягивают соседние, и происходит внедрение в полость формы. Величина заращения зависит от геометрии полости и ее ориентации в магнитном поле.

Отрицательное влияние заращения при получении отливок в магнитных формах проявляется в образовании специфического дефекта: в отливку внедряются частицы дроби. Для уменьшения вероятности образования таких дефектов выжигаемую модель в процессе формовки нужно ориентировать по возможности таким образом, чтобы при помещении формы в магнитное поле более длинные стороны модели располагались вдоль силовых линий магнитного поля. Для более плотной упаковки формовочного материала формовку целесообразней производить на вибростоле.

7. БРАК ОТЛИВОК И МЕРЫ ЕГО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ

Особенности литья по газифицируемым моделям могут предопределять некоторые специфические дефекты, которые являются в основном

следствием взаимодействия металла с продуктами деструкции модели. Механизм такого взаимодействия приведен в 4. При литье в песчаных формах без связующего возникновение дефектов связано в основном с обвалом песка. Из-за того что опыт производства отливок по моделям из пенополистирола не имеет широкого распространения, нет возможности дать исчерпывающую классификацию всех дефектов этого метода и в полной мере объяснить их причины, поэтому приведем часто встречающиеся дефекты, характерные для данного способа литья, и меры по их предупреждению (табл. 7).

Таблица 7

Классификация дефектов, причины их образования и способы предупреждения при литье по газифицируемым пенополистироловым моделям

Вид дефекта	Причина образования	Способ предупреждения
<p>1. Набор – волнистая шероховатость на верхней и боковой поверхности чугунной отливки. Поверхность дефекта покрыта пленками блестящего углерода. Обнаруживается визуально</p> <p>Исправляют зачисткой абразивом и шпатлевкой</p>	<p>Низкая газопроницаемость формы, высокая скорость заливки, большая объемная масса пенополистирола. Неправильный подвод металла и неравномерность подъема его по всему сечению модели</p>	<p>Увеличить газопроницаемость формы, залить со скоростью, оптимальной для данного метода литья. Применить для изготовления моделей пенополистирол с меньшей плотностью. Равномерно распределить подвод к модели. Изменить положение модели в форме, уменьшить величину λ, формула (2)</p>
<p>2. Углеродистые раковины</p> <p>А – глубокие раковины и складки, локально расположенные на – верхней, реже на боковой поверхности чугунных отливок;</p> <p>Б – обычно эти раковины заполнены сажистым углеродом, под которым находится пленка блестящего углерода. Обнаруживаются визуально</p> <p>Мелкие раковины заделывают эпоксидной замазкой, глубокие – заваривают</p>	<p>Высокая скорость заливки, большая плотность пенополистирола, низкая газопроницаемость формы, разрежение в элементах литниковой системы</p> <p>Неправильное положение модели в форме</p> <p>Недостаточная газопроницаемость противопригарного покрытия</p>	<p>Уменьшить скорость заливки и плотность пенополистирола. Увеличить газопроницаемость формы. Изменить конструкцию стояка и литниковой системы, равномерно подвести металл по всему сечению модели. Расположить модель так, чтобы коэффициент λ был минимальным</p> <p>Поставить закрытые выпора и произвести перелив металла, повисить газопроницаемость противопригарной краски</p>

<p>3. Углеродистые пленки, поверхность покрыта пленками блестящего углерода, имеется шероховатость. Дефект характерен для чугунных отливок. Обнаруживается визуально. Исправления не требует</p>	<p>Низкая газопроницаемость формы</p>	<p>Увеличить газопроницаемость формы</p>
--	---------------------------------------	--

Продолжение табл 7

Вид дефекта	Причина образования	Способ предупреждения
<p>4. Выпот – наплавы металла на поверхности отливки в виде бугорков и капель, как результат обратной ликвации в процессе кристаллизации. Поверхность дефекта покрыта пленками блестящего углерода, имеются скопления сажистого углерода. Дефект располагается на боковой поверхности массивных стенок(>20 мм) чугунных отливок. Обнаруживается визуально Исправляется зачисткой абразивом</p>	<p>Низкая газопроницаемость формы, неправильный подвод металла по всему сечению модели. Неправильное положение модели в форме. Низкая газопроницаемость противопопригарного покрытия. Большая плотность пенополистирола</p>	<p>Увеличить газопроницаемость формы. Заливку производить с оптимальной скоростью подъема металла. Обеспечить равномерный подъем металла. Расположить модель так, чтобы коэффициент λ был минимальным. Повысить газопроницаемость противопопригарной краски. Установить керамические или стеклянные трубки для лучшего удаления газа. Уменьшить плотность пенополистирола</p>
<p>5. Газовые раковины, глубокие закрытые или полужакрытые; расположены в верхней части отливки; поверхность раковины покрыта пленками блестящего углерода Дефект характерен для чугунных и бронзовых отливок. Обнаруживается визуально или при механической обработке Исправляется наваркой металла или деталь бракуется</p>	<p>Излишне высокая скорость заливки</p>	<p>Снизить скорость заливки. Поставить выпор закрытого типа</p>

<p>6. Металлические пленки – дефект на боковых поверхностях чугуновых отливок в виде металлических настывлей; является результатом выдавливания металла через микротрещины в затвердевающем слое на поверхности отливки Исправляется зачисткой абразивом</p>	<p>Низкая газопроницаемость формы и противопригарного покрытия. Неравномерный подъем металла по сечению модели</p>	<p>Увеличить газопроницаемость формы и противопригарного слоя. Изменить подвод металла</p>
<p>7. Расслоение – крупные плоские пустоты в верхней части алюминиевых отливок. Обнаруживается визуально или при механической обработке Отливка бракуется</p>	<p>Высокая скорость заливки</p>	<p>Снизить скорость заливки. Установить выпор в верхней части отливки</p>

Продолжение табл.7

Вид дефекта	Причина образования	Способ предупреждения
<p>8. Спаи и неслитины – вид дефекта отливок из алюминиевых сплавов, образующегося в результате захвата металлом жидкой фазы деструктирующего модельного материала. Обнаруживается визуально</p>	<p>Низкая скорость заливки и неравномерный подъем металла по сечению модели. Холодный металл</p>	<p>Увеличить скорость и температуру заливки</p>
<p>9. Газовая пористость – мелкие раковины, поражающие верх, иногда боковые части отливок, преимущественно стальных</p>	<p>Низкая газопроницаемость формы и противопригарного покрытия. Высокая скорость заливки</p>	<p>Уменьшить скорость заливки. Увеличить газопроницаемость формы и противопригарного покрытия</p>
<p>10. Обезуглерожженный слой – поверхностное обезуглероживание стальных массивных отливок</p>	<p>Отсутствие карбюратора в формовочной смеси</p>	<p>Выбивка отливки при высоких температурах (~700 °С). Введение карбюратора в формовочную смесь</p>
<p>11. Цементация – науглероживание поверхностного слоя стальной отливки. Устраняется отжигом</p>	<p>Низкая газопроницаемость формы и противопригарного покрытия. Большая плотность модели. Очень медленная или очень быстрая заливка</p>	<p>Увеличить газопроницаемость формы и противопригарного покрытия. Уменьшить плотность полистирола. Залить с оптимальной скоростью</p>

<p>12. Графитизация – насыщение углеродом поверхностного слоя стальной отливки, обнаруживается при просмотре шлифа под микроскопом. В центре ферритных зерен имеются скопления графита</p>	<p>Низкая газопроницаемость формы и противопригарного покрытия</p>	<p>Увеличить газопроницаемость формы и противопригарного покрытия</p>
<p>13. Грубая форма графита в чугунных отливках. Просматривается на шлифе под микроскопом</p>	<p>Низкая газопроницаемость формы и противопригарного покрытия</p>	<p>Увеличить газопроницаемость формы и противопригарного покрытия</p>
<p>14. Наросты – металлические гребешки, отдельные выступы неправильной формы. Обнаруживаются визуально. Исправляются зачисткой абразивом</p>	<p>Слабое уплотнение формы Тонкий слой противопригарного покрытия</p>	<p>Равномерно уплотнить форму, увеличить толщину противопригарного покрытия</p>
<p>15. Сетка – отпечатки на поверхности отливки углублений в месте спая модели из пенополистирола. Обнаруживается визуально</p>	<p>Гранулы плохо сварились между собой при изготовлении модели</p>	<p>Повысить качество поверхности модели. Заделывать несварившиеся места воском или другими материалами</p>
<p>16. Обвал – неправильной формы полости в теле отливки, заполненные песком, образуются в результате местного разрушения формы Мелкие дефекты могут быть устранены зачисткой или механической обработкой Отливка обычно имеет глубокие песчаные раковины и бракуется</p>	<p>Очень медленная заливка формы, в результате чего давление недостаточно. Ударное действие струи металла на стенку формы. Слабое уплотнение песчаной формы. Разрежение в питателе. Неправильная вентиляция формы. Недостаточная прочность противопригарного покрытия. Модель разрушается неравномерно в результате действия газов. Газы направлены по границе модель - форма, в результате происходят крупные обвалы стенок формы</p>	<p>Увеличить скорость заливки. Изменить конструкцию литниковой системы. Уплотнить форму. Устранить разрежение в питателе. Улучшить вентиляцию стенок и частей формы, выполняющих внутренние части отливки. Увеличить толщину противопригарного покрытия Установить местные газоотводные каналы в виде керамических и стеклянных трубок</p>
<p>17. Песчаные раковины образуются в результате намыва металлом песка со стенок формы, разрежения формы в стояке и других частях литниковой системы. Обнаруживаются визуально (выходящие поверхности) при рентгеновском и ультразвуковом контроле или при механической обработке (скрытые внутри</p>	<p>Разрежение в элементах литниковой системы. Нарушение целостности слоя противопригарного покрытия. Недостаточная газопроницаемость формы. Слабое уплотнение формы. Неправильная конструкция литниковой системы Высокая скорость за-</p>	<p>Изменить конструкцию литниковой системы и устранить разрежение в литниковой системе. Изменить направление движения потока металла. Увеличить толщину противопригарного покрытия и газопроницаемость формы и стенок опоки</p>

тела отливки) Мелкие дефекты могут быть исправлены зачисткой, заваркой, декоративной заделкой с помощью пластмасс, специальных шпаклевок и т. д.	ливки, турбулентность потока металла. Недостаточная толщина огнеупорного покрытия	Увеличить плотность формы
18. И с к а ж е н и е ф о р м ы о т л и в к и – нарушение ее геометрии, обнаруживаемое визуально при разметке с помощью измерительных инструментов и шаблонов	Слабое уплотнение формы. Деформация модели при засыпке и уплотнении песка. Недостаточная загрузка формы	Уплотнить форму. Устранить деформацию модели, например, установкой ребер жесткости. Увеличить вес груза
19. П о д у т и е – местные увеличения размеров отливки в результате деформации формы. Обнаруживается визуально либо при контроле измерительным инструментом	Слабое уплотнение формы. Недостаточная загрузка формы	Уплотнить форму и увеличить вес груза
20. К и п – локальные рыхлоты на верхней части алюминиевых отливок. Обнаруживается визуально Исправляется вырубкой и заделкой эпоксидной смолой	Быстрая заливка формы металлом. Повышенная плотность пенополистирола. Низкая газопроницаемость формы. Холодный металл	Снизить скорость заливки. Уменьшить плотность полистирола. Увеличить газопроницаемость формы и повысить температуру металла

Заключение

Таким образом литье по выжигаемым (или газифицируемыми) моделям имеет широкие возможности. Если необходимо изготовить одну отливку сложной конфигурации и достаточно больших размеров, для которой требуется изготовление сложной модели, что ведет к большим затратам, то можно изготовить модель из пенополистирола, который легко обрабатывается. Поэтому затраты на изготовление модели снижаются.

Особенность литья по выжигаемым моделям заключается в том, что в форме может отсутствовать разъем. Поэтому исключаются дефекты, связанные с этим недостатком, а именно: смещение частей отливок, расположенных в верхней и нижней полуформах. Удаление модели производится выжиганием. При этом образующиеся продукты сгорания модели осаждаются на стенках формы и фильтруются через формовочную смесь. Данная особенность накладывает специфические требования к разработке технологии. Прежде всего материал модели должен быть по возможности наи-

менее газотворным. Наиболее подходящим материалом для этих целей служит пенополистирол, который имеет низкую плотность (0,01...0,05). Изложенные в работе особенности при термодиструкции модели для разных температурно-временных режимов дают полное представление о данных процессах, что позволяет учесть их при разработке технологии. Модель из формы может удаляться после операции формовки путем выжигания или оставаться в форме до самой заливки. В процессе заливки она удаляется выжиганием (термодиструкцией) от тепла жидкого металла. Это позволяет использовать форму с невысокой степенью уплотнения или из сухого песка. Это снижает трудоемкость формовки.

Литература

1. *Озеров В. А., Шуляк В. С., Плотников Г. А.* Литье по моделям из пенополистирола. М.: Машиностроение, 1970. 182 с.

2. *Иванов В. И. и др.* Технологические особенности процесса литья по газифицируемым моделям // Производство отливок по пенополистироловым моделям. М.: НИИМАШ, 1966.

3. *Чурновский А. Р.* Литье по моделям из пенопласта. М.: Химиздат, 1970.

4. *Технологический* процесс изготовления отливок по пенополистироловым газифицируемым моделям: Руководящие материалы НИИмаш, 1975. 51 с.

5. *Степанов Ю. А.* Проверочный расчет литниковой системы при литье по газифицируемым моделям // Известия вузов СССР. Машиностроение. 1966. № 11.

6. *Степанов Ю. А., Анучина М. Г., Кирпиченко В. П.* Формирование отливки при литье по газифицируемым моделям // Литейное производство. 1967. № 9.

УДК 681. 518

ББК К 61

Учебное издание

Григорьев Владимир Михайлович

ЛИТЬЕ ПО ВЫЖИГАЕМЫМ МОДЕЛЯМ

Учебное пособие

Главный редактор *Л. А. Суевалова*

Редактор *Е. Н. Ярулина*

Компьютерная верстка *В. М. Григорьева*

Дизайн обложки *Л. В. Задвернюк*

Лицензия на издательскую деятельность ЛР № 020526 от 23.04.97

Подписано в печать 21.03.01. Формат 60 x 84 1/16.

Бумага писчая. Гарнитура «Таймс». Печать офсетная. Усл. печ. л. .2,8

Уч.-изд. л. 2,4. Тираж 100 экз. Заказ . С 46.

Издательство Хабаровского государственного технического
университета.

680035, Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136.

Отдел оперативной полиграфии издательства

Хабаровского государственного технического университета.